

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого
Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту**

«До захисту в ЕК»

«До захисту допущено»

Директор інституту (декан факультету)

Завідувач кафедри

(підпис) Блаженко С.І.
(прізвище та ініціали)

(підпис) Балюта С.М.
(прізвище та ініціали)

«__» _____ 2021 р.

«__» _____ 2021 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

з спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання»
на тему: «Моделювання режимів систем електропостачання з розподіленою генерацією та використанням частотно-регульованого електроприводу»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЗЕЛ-2-ЗМ

(прізвище, ім'я, по батькові повністю) Твердий Ігор Валерійович
(підпис)

Керівник _____
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) Балюта Сергій Миколайович
(прізвище та ініціали) (підпис)

Консультанти _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали) Бондар В.І.
(підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2021 р.

Національний університет харчових технологій
 Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім акад І.С. Гулого
 Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту
 Освітній ступень магістр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».
 Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕПЕМ

/Балюта С.М./

« 09 » листопада 2020 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

Твердий Ігор Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Моделювання режимів систем електропостачання з розподіленою генерацією та використанням частотно-регульованого електроприводу»

керівник проекту (роботи) Балюта Сергій Миколайович, д. т. н., професор
 затверджені наказом вищого навчального закладу від « 09 » 11.2020р. № 935-кв

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 04 лютого 2021 року

3. Вихідні дані до роботи (проекту) є розробка та дослідження моделей динамічних режимів системи електропостачання з розподіленою генерацією при масовому використанні частотно-регульованих електродвигунів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Розробити моделі системи електропостачання з частотно-регульованим електроприводом і установками розподіленої генерації. 2. Дослідити вплив різних факторів при моделюванні нормальних і перехідних режимів системи електропостачання з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом. 3. Дослідження динамічних режимів складної системи електропостачання з розподіленою генерацією при масовому пуску асинхронних двигунів і в аварійних ситуаціях. 4. Дослідити динамічну поведінку системи електропостачання з розподіленою генерацією і масовим використанням ЧРЕП

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація (27 слайдів)

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____ 09 листопада 2020 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

По р. №	Назва етапів виконання проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Отримання завдання на дипломне проектування	09.11.2020	
2	Вступ	10-13.11.2020	
3	Характеристика проблеми і постановка завдання дослідження		
4	Загальна частина	14-24.11.2020	
5	Постановка завдання дослідження		
6	Розробка моделей і дослідження СЕП з розподіленою генерацією та ЧРЕП		
	Моделювання СЕП з роподіленою генерацією та ЧРЕП		
7	Дослідження впливу різних чинників на динаміку СЕП приїї паралельній роботі з ЕЕС		
8	Технологічна частина	25.11-29.12.20	
9	Розробка математичної моделі для дослідження аварійних режимів в СЕП сільськогосподарського району		
	Дослідження процесів в СЕП при аварійних ситуаціях		
10	Спеціальна частина	30.12.20-26.01.21	
11	Дослідження стійкості СЕП при різній довжині лінії між генераторами		
12	Розробка заходів з заходів підвищення динамічної стійкості СЕП при масовому використанні ЧРЕП		
13	Висновки		
14	Список посилань		
15	Оформлення пояснювальної записки	27-31.01.2021	

Магістрант

_____ (підпис)

Твердий І. В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Балюта С. М.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Твердий І.В. Моделювання режимів систем електропостачання з розподіленою генерацією та використанням частотно-регульованого електроприводу. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Освітньо-професійна програма: Електротехнічні системи електроспоживання. Магістерська робота. Національний університет харчових технологій. Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого. Кафедра електропостачання та енергоменеджменту. – Київ.: НУХТ, 2021.

Стор. - 123; рис. - 107; табл. -10; джерел – 110.

У магістерській роботі виконано дослідження режимів системи електропостачання сільськогосподарського району з установками розподіленої генерації у вигляді дизель-генератора.

Для проведення дослідження розроблена математична модель у середовищі Matlab/Simulink, яка включає моделі ліній електропередачі, енергосистеми, дизель-генератора, силового трансформатора, асинхронного двигуна, частотного перетворювача, комутаційних апаратів. Проведені розрахункові дослідження режимів масового пуску нерегульованих асинхронних електроприводів та частотно-регульованих електроприводів з різними видами механічного навантаження, а також аварійні режими у вигляді трифазного короткого замикання.

Запропоновані заходи з підвищення стійкості роботи системи електропостачання в динамічних режимах шляхом встановлення додаткових джерел розподіленої генерації. Ефективність запропонованих заходів підтверджена імітаційним моделюванням.

Ключові слова: СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

ANNOTATION

Tverdyi I.V. Modeling of modes of power supply systems with distributed generation and use of frequency-regulated electric drive. 141 – Electric power, electrical engineering and electromechanics. Educational and professional program: Electrical power consumption systems. Master thesis. National University of Food Technology. Educational and Scientific Engineering and Technical Institute. acad. I.S. Gulogo. Department of Power Supply and Energy Management. – KYIV.: NUFT, 2021.

Pages - 123 ; drawings - 107; tables -10; sources – 110.

In the master's thesis the research of modes of the power supply system of the agricultural area with installations of the distributed generation in the form of the diesel generator is executed.

To conduct the study, a mathematical model was developed in the Matlab / Simulink environment, which includes models of power lines, power system, diesel generator, power transformer, induction motor, frequency converter, switching devices. Estimated studies of mass start-up modes of unregulated asynchronous electric drives and frequency-regulated electric drives with different types of mechanical load, as well as emergency modes in the form of a three-phase short circuit.

Measures to increase the stability of the power supply system in dynamic modes by installing additional sources of distributed generation are proposed. The effectiveness of the proposed measures is confirmed by simulation.

Keywords: POWER SUPPLY SYSTEM, FREQUENCY-REGULATED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, DISTRIBUTED GENERATION, DIESEL GENERATOR

АННОТАЦИЯ

Твердый И.В. Моделирование режимов систем электроснабжения с распределенной генерацией и использованием частотно-регулируемого электропривода. 141 – Электроэнергетика, электротехника и электромеханика. Образовательно-профессиональная программа: Электротехнические системы электропотребления. Магистерская работа. Национальный университет пищевых технологий. Учебно-научный инженерно-технический институт им. акад. И.С. Гулого. Кафедра электроснабжения и энергоменеджмента. – Киев.: НУПТ, 2021.

Стр. - 123; рис. - 107; табл. -10; источников – 110.

В магистерской работе выполнено исследование режимов системы электроснабжения сельхозпредприятий района с установками распределенной генерации в виде дизель-генератора.

Для проведения исследования разработана математическая модель в среде Matlab / Simulink, которая включает модели линий электропередачи, энергосистемы, дизель-генератора, силового трансформатора, асинхронного двигателя, частотного преобразователя, коммутационных аппаратов. Проведенные расчетные исследования режимов массового пуска нерегулируемых асинхронных электроприводов и частотно-регулируемых электроприводов с различными видами механической нагрузки, а также аварийные режимы в виде трехфазного короткого замыкания.

Предложенные меры по повышению устойчивости работы системы электроснабжения в динамических режимах путем установления дополнительных источников распределенной генерации. Эффективность предложенных мероприятий подтверждена имитационным моделированием.

Ключевые слова: СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЯ, ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

Зміст

	Стор.
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	9
Вступ.....	10
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	12
1.1. Особливості розвитку розподіленої генерації	12
1.2. Особливості асинхронного електроприводу з частотним регулюванням	17
1.3. Математичні моделі синхронної машини, дизельної електростанції та асинхронного двигуна з частотним регулюванням	24
1.4. Постановка завдання дослідження.....	36
Висновки до розділу 1.....	37
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ MATLAB / SIMULINK	38
2.1. Моделювання системи електропостачання з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом	38
2.2. Дослідження впливу різних чинників на динаміку системи електропостачання при її паралельній роботі з ЕЕС	45
Висновки до розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ РГ І МАСОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ЧРЕП В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ	65
3.1. Характеристики схеми електропостачання	65
3.2. Розробка математичної моделі для досліджень аварійних режимів в системі електропостачання сільськогосподарського району	67
3.3. Дослідження процесів в системі електропостачання при масовому пуску асинхронних двигунів	71

3.4. Дослідження динамічних режимів системи електропостачання при аварійних ситуаціях	79
3.5. Дослідження стійкості системи електропостачання при різній довжині лінії між генераторами.....	87
3.6. Розробка заходів з заходів підвищення динамічної стійкості системи електропостачання при масовому використанні частотно-регульованого електропривода.....	97
Висновки до розділу 3.....	108
ВИСНОВКИ.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	112
ДОДАТКИ.....	121
ДОДАТОК А.....	124
ДОДАТОК Б.....	125
ДОДАТОК В.....	127

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун;
АІН - автономний інвертор напруги;
ВІД - вентильно-індукторний двигун;
ВДЕ - поновлюване джерело енергії;
ПЛ - повітряна лінія;
ВЛЕП - повітряна лінія електропередачі;
ВЕУ - вітроенергетична установка;
ГЕС - гідроелектростанція;
ГТУ - газотурбінна установка;
Д-Г - дизель-генератор;
ДЕС - дизельна електростанція;
ВО - виконавчий орган;
ККД - коефіцієнт корисної дії;
КЗ – коротке замикання;
ПУЕ - правила улаштування електроустановок;
ПЧ - перетворювач частоти;
РГ - розподілена генерація;
СГ - синхронний генератор;
СМ - синхронна машина;
СЕС - система електропостачання;
ТМ - трифазний масляний трансформатор;
ТЕЦ - теплоелектроцентрально;
ЧРЕП - частотно - регульований електропривод;
ШД - кроковий двигун;
ШІМ - широтно-імпульсна модуляція;
ЕЕ - електроенергія;
ЕЕС - електроенергетична система;
ЕП - електропривод;

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

В даний час в галузях економіки з'являється багато промислових підприємств, автоматичних насосних станцій, електроприводів типових виробничих механізмів, що дозволяють вирішити різні технологічні проблеми підприємств. При підключенні підприємств, насосних станцій та інших електроприймачів до електричної мережі виникає залежність цих споживачів від електричної мережі, в свою чергу стабільність роботи електричної мережі впливає на економічну ефективність підприємств.

Багато країн, включаючи Україну, мають розвинені фермерські господарства з масовим використанням електроприводу насосів та інших агрегатів. При цьому впроваджується частотне регулювання електроприводу, що забезпечує ряд позитивних ефектів.

Масове використання частотно-регульованого електроприводу істотно змінює властивості і режими роботи систем електропостачання, що постачають електроенергію цих споживачів, особливо при наявності в системі електропостачання установок розподіленої генерації.

У системах електропостачання з розподіленою генерацією застосовується електропривод змінного струму (зокрема асинхронні двигуни), що робить істотний вплив на якість електричної енергії. У зв'язку з цим розробка моделей, що розглядають динамічну поведінку системи електропостачання з розподіленою генерацією і масовим використанням частотно-регульованого електропривода, є актуальним завданням.

Об'єктом дослідження даної роботи є система електропостачання з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом.

Предметом дослідження є динамічні режими системи електропостачання при масовому застосуванні асинхронних двигунів, які використовуються в якості приводу для технологічних агрегатів фермерських господарств.

Метою роботи є розробка та дослідження моделей динамічних режимів системи електропостачання з розподіленою генерацією при масовому використанні частотно-регульованих електродвигунів.

Для досягнення поставленої мети в роботі потрібно було вирішити такі завдання:

1. Розробити моделі системи електропостачання з частотно-регульованим електроприводом і установками розподіленої генерації;
2. Дослідити вплив різних факторів при моделюванні нормальних і перехідних режимів систем електропостачання з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом;
3. Дослідження динамічних режимів складної системи електропостачання з розподіленою генерацією при масовому пуску асинхронних двигунів і в аварійних ситуаціях;
4. Дослідити динамічну поведінку системи електропостачання з розподіленою генерацією і масовим використанням ЧРЕП.

Наукова новизна роботи включає наступні положення:

1. Розроблена модель і виконано аналіз впливу різних чинників на систему електропостачання, що включає дизельну електростанцію в якості установки розподіленої генерації і частотно-регульований асинхронний двигун, при паралельній роботі СЕП з ЕЕС.
2. Обґрунтовано і сформована математична модель складної системи електропостачання з розподіленою генерацією і ЧРЕП для дослідження аварійних режимів системи і динамічних режимів масового пуску нерегульованих асинхронних двигунів і частотно-регульованих електроприводів, які використовуються в якості приводу для насосів.
3. Отримано нові результати досліджень динамічної поведінки при аварійних ситуаціях в складній системі електропостачання з розподіленою генерацією та масовим використанням асинхронних двигунів і частотно-регульованих електроприводів. Виявлено стабілізуючий вплив на поведінку системи електропостачання з розподіленою генерацією масового частотно-регульованого електроприводу.

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Особливості розвитку розподіленої генерації

Електростанція є важливою частиною електричної системи. З точки зору економії, чим потужніший електростанція, тим вище економічна ефективність. Однак в залежності від поставок первинних енергоресурсів, електростанції часто розташовуються на значній відстані від споживачів, від житлових районів.

Система передачі і розподілу вирішує завдання передачі електроенергії від електростанції до споживача. Це модель централізованого виробництва електроенергії в традиційному вигляді, коли витрати на транспорт палива і будівництво електростанцій поблизу центрів навантажень значно перевищують вартість будівництва електричної мережі для передачі і розподілу.

Аварії в електричній системі відбуваються в основному в мережі передачі і розподілу електроенергії, особливо внаслідок коротких замикань на лініях або перевантаження на трансформаторних підстанціях. Крім того, з розвитком сучасних технологій, витрати на будівництво електростанцій знизилися, ефективність помітно покращилася. Таким чином, електрична мережа стала основним фактором в структурі собівартості електроенергії і проблемах, пов'язаних з якістю електропостачання.

Розподілена генерація базується на виробництві електроенергії малими установками, розташованими поблизу або в точці споживання енергії. Хоча ця модель має менш високу економічну ефективність у порівнянні з моделлю централізованого виробництва електроенергії, але має надмірність і більшу надійність електропостачання через не надто великої залежності від електричної мережі передачі і розподілу електроенергії.

Крім того, ця модель надає споживачам можливість використання електроенергії незалежно від того, чи вони можуть управляти електростанцією для обслуговування себе. Розвиток малих електростанцій не має нічого особливо нового, дизель-генератор є одним із прикладів джерел розподіленої

генерації. Однак, раніше технологія електростанцій малої потужності мала високу вартість і низьку ефективність. З урахуванням сучасних технологій, можна встановити електростанції потужністю в десятки мегават з високою продуктивністю і низькою ціною, розміщуючи їх поруч з місцями споживання електроенергії. Це не тільки знижує витрати на передачу енергії, а й зменшує відмови і економічні збитки.

Протидіючи ризику зміни клімату, стихійних лих і тероризму, в багатьох країнах по всьому світу почали вивчати проекти «Планування адаптації», в тому числі є проекти будівництва локальної розподіленої генерації, що забезпечують безперебійне живлення особливо важливим навантажень, наприклад поліції, пожежних частин та лікарням. Модель розподіленої генерації може бути використана у віддалених районах і на островах, де централізована подача електрики буде занадто важкою, складною і потребує великих витрат.

Джерелами енергії для розподіленої генерації можуть бути різні установки, такі як когенерація, паливні елементи, поновлювані джерела енергії (енергія вітру, сонячна енергія, енергія відходів, і т.д.). В даний час вітроенергетичні установки і сонячні панелі досить популярні в світі. Розподілена генерація була розроблена як підхід до використання поновлюваних джерел енергії, не перевантажуючи електричної мережі. Це один із заходів, прийнятих країнами в усьому світі, яка використовується для зниження викидів парникових газів. Австралія, Німеччина прагнуть в 2050 році використовувати до 80% поновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії, Канада і Нова Зеландія пропонують цифру в 90% для цієї мети в 2025 році [21, 22]. Однією з найбільших труднощів у розвитку відновлюваної розподіленої генерації є високі інвестиції. Проте, в останні роки вартість технологій виробництва електроенергії з використанням відновлюваних джерел енергії має тенденцію до зниження. Так що розподілена генерація є тенденцією майбутнього.

Широке поширення розподіленої генерації пояснюється рядом факторів. В першу чергу тут слід зазначити підвищення енергоефективності за рахунок

можливого виробництва електроенергії і тепла з використанням єдиного джерела первинної енергії. Це стає особливо привабливим в тих випадках, коли в результаті процесів, які використовуються на промисловому підприємстві, виникають побічні продукти, які можуть використовуватися як для електростанції. Додаткова користь в таких випадках - зниження викидів вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин (CO , Mo_x і SO_2) в атмосферу. Сюди ж відноситься зменшення шкоди, що завдається спалюванням попутного нафтового газу «на факелах» [22].

Розподілена генерація в безпосередній близькості від центру навантаження створює можливість відстрочки або зовсім усуває необхідність спорудження регіональних електростанцій і додаткової мережевої інфраструктури за рахунок "зрізання" пікового споживання і розвантаження існуючих мереж. Наявність джерел напруги в безпосередній близькості від навантаження збільшує надійність енергопостачання, сприяє підтримці належних рівнів напруги в мережі і знижує ризик втрати стійкості. За рахунок розподіленої генерації знижуються втрати в мережах і перетоки реактивної потужності.

Розподілена генерація може надати підтримку системі в аварійних ситуаціях і тим самим запобігти їх виникненню або знизити величину збитку. В результаті знижується тарифне навантаження на споживачів, що обслуговуються енергосистемою, оскільки відбувається стримування інвестиційних витрат. Очевидно, що капітальні витрати на спорудження об'єкта розподіленої генерації несе його власник і їх не треба "розподіляти" на всіх інших споживачів. Крім цього, фінансові ризики, пов'язані з об'єктами малої і середньої генерації, набагато нижче, ніж для об'єктів з великою встановленою потужністю [23, 24].

Не в останню чергу слід відзначити зниження вразливості від терористичних атак, оскільки захист розподіленої генерації від такого роду диверсій інтегрований з охороною самого промислового підприємства. Для потенційного власника об'єкта розподіленої генерації в результаті його експлуатації витрати на енергопостачання стають досить передбачуваними, що

дає можливість довгострокового планування виробництва та інвестицій в розвиток. Це особливо важливо в країнах, де зростання тарифів, особливо в останні роки, важко передбачити, не кажучи вже про частих змінах законодавства і методів регулювання.

Власне джерело електроенергії для його власника дає серйозне збільшення надійності енергопостачання. Як добре відомо, більшість перерв в енергопостачанні пов'язано з позаштатними ситуаціями в мережевому господарстві. При такого роду аварії наявність власної електростанції дозволяє забезпечити безперебійне електропостачання, особливо там, де виробничий процес не терпить навіть тимчасової відсутності електроживлення.

Власна електростанція дає можливість розширення виробництва на підприємстві, так як немає необхідності чекати розвитку інфраструктури постачальниками електроенергії [23- 25].

Тенденції розвитку електроенергетики в світі пов'язані не тільки з ростом масштабів виробництва електроенергії на традиційних великих електростанціях, але і зі збільшенням частки розподіленої генерації. Ці тенденції визначаються необхідністю адаптації споживачів і розвитку ЕЕС до ринкової невизначеності, появою нових високоефективних енергетичних технологій, зростанням частки високоякісних видів палива, посиленням екологічних вимог, стимулюючим використанням ВДЕ при протекціоністській політиці держав [26].

Сюди також відноситься і підвищена настороженість по відношенню до екологічних наслідків експлуатації великих енергосистем і бажання відокремитися від них, по можливості за рахунок джерел «чистої» енергії. Протистояти цій тенденції безглуздо. Розумніше прийняти її до відома і спробувати знайти оптимальне співвідношення між централізованим виробництвом електричної і теплової енергії та локальними їх джерелами, швидше за все середніми і малими.

Світові тенденції органічного поєднання централізованої і розподіленої генерації характерні. При цьому, якщо економічні умови для розвитку малих

ГТУ-ТЕЦ досить прийнятні і в даний час, то для розвитку розподіленої генерації на ВДЕ поки не створені необхідні економічні, законодавчі та організаційні умови. [26-28].

Зростання частки розподіленої генерації в ЕЕС не тільки має позитивні сторони, але і створює певні технічні проблеми, які пов'язані зі зміною властивостей систем, можливостей управління ними в нормальних і аварійних умовах. Ці проблеми можна вирішити, однак при цьому ускладнюється диспетчерське та автоматичне керування ЕЕС, потрібна розробка нових математичних моделей по обґрунтуванню розвитку ЕЕС і систем електропостачання, аналізу їх режимів і управління ними [27, 28].

Енергосистема майбутнього повинна буде поєднувати великі електростанції, без яких неможливо електропостачання великих споживачів і забезпечення зростання електроспоживання, і розподілену генерацію. Розподільчі великі підстанції дозволяють підвищувати напругу з генераторного до напруг магістральної мережі, по якій йде транспорт електроенергії до великих центрів споживання [29].

Установки розподіленої генерації, в тому числі на ВДЕ, працюють через розподільні мережі. Третій рівень складуть міні- і мікро-установки (міні-і мікро-ГЕС, вітро-генератори, сонячні електростанції, паливні елементи і т.п.), які підключаються на низькій напрузі і встановлюються у невеликих споживачів, наприклад, в окремих будинках або на малих підприємствах, в тому числі сільськогосподарських. Сучасні засоби управління і зв'язку дозволяють реалізувати інформаційний зв'язок [30].

За результатами обстежень та оцінки, Україна є однією з країн, що мають великий потенціал для розвитку розподіленої генерації з використанням відновлюваних джерел енергії.

За оцінкам міжнародного агентства IRENA, Україна має найбільший серед країн Південно-Східної Європи технічний потенціал використання ВДЕ - 408,2 ГВт (без урахування великих ГЕС). Найбільшою є технічна можливість застосування вітрових та сонячних електростанцій: 321 ГВт та 71 ГВт

відповідно. Економічно-доцільний потенціал впровадження ВДЕ в Україні станом на 20-30 рік оцінюється у 16-22 ГВт, в порівнянні з 1,1 ГВт, що фактично встановлені на кінець 2016 року. Потенціал впровадження ВДЕ в теплоенергетиці навіть більший, та за оцінками експертів може повністю замінити традиційні джерела енергії до 2030 року. Так, за оцінками IRENA, у 2030 році з ВДЕ може бути виготовлений близько 57 млн ГКал теплової енергії, з якої значна частка (32,7 млн ГКал) - біомаса. Виконання даного прогнозу дозволить зекономити близько 7 млрд м³ природного газу щороку. Очікується, що у наступні 10 років вартість технологій ВЕД та СЕС знизиться на 13% та 57% відповідно, що значний сприятиме впровадженню ВДЕ в Україні. За умови стабільного економічного та політичного середовища, та покращення умов фінансування проектів ВДЕ, Україна зможе значною мірою модернізувати та забезпечити енергонезалежність електричної та теплової генерації за рахунок технологій відновлюваної енергетики.

1.2. Особливості асинхронного електроприводу з частотним регулюванням

Сучасний частотно-регульований електропривод складається з асинхронного або синхронного електричного двигуна і перетворювача частоти (ПЧ) як показаний на рис.1.1.

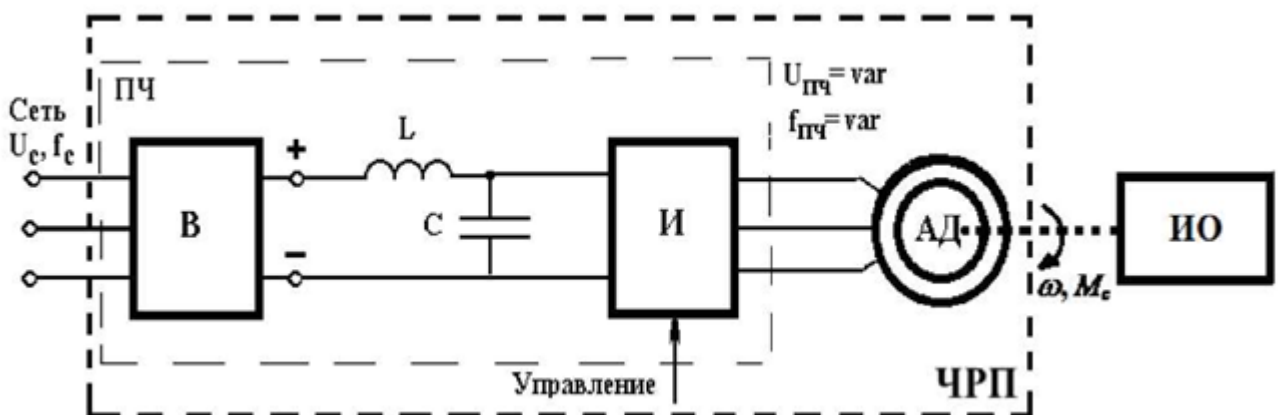


Рис.1.1. Частотно - регульований електропривод

Електричний двигун перетворює електричну енергію в механічну енергію і приводить в рух виконавчий орган (ИО) технологічного механізму.

Перетворювач частоти управляє асинхронним двигуном і являє собою електронний статичний пристрій, що складається з випрямляча (В) і інвертора (І). На виході перетворювача формується напруга зі змінною амплітудою і частотою. Назва «частотний електропривод» обумовлено тим, що регулювання швидкості обертання двигуна здійснюється зміною частоти напруги живлення, що подається на двигун від перетворювача частоти.

Актуальною проблемою керування електроприводами, де широко застосовуються в якості виконавчих двигунів асинхронні двигуни, є підвищення точності і досягнення граничних динамічних і енергетичних показників при регулюванні моменту і швидкості. Електроприводи змінного струму з частотним, частотно-струмовим і векторним керуванням є конкурентоспроможними за точністю, швидкодією і діапазонами регулювання швидкості по відношенню до електроприводів постійного струму.

В даний час застосування автоматизованого електроприводу забезпечує необхідні регульовальні характеристики використовуваних машин і механізмів, а також дозволяє значно знизити споживання електроенергії [32]. Активний розвиток силової електроніки і швидкодіючої мікропроцесорної техніки призвело до витіснення використовуваних до 70-80-х років минулого століття регульованих ЕП постійного струму приводами на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Це пояснюється можливістю практичної реалізації ефективних алгоритмів керування двигуном змінного струму при невеликих апаратних і матеріальних витратах.

Сьогодні в світі випускається до 8 млрд. електродвигунів в рік, які споживають 70% виробленої електроенергії [33]. Щорічно ринок електричних машин і електроприводів для них зростає на 5-10%. В даний час частка ЕП змінного становить близько 85%. Активно збільшується і виробництво електродвигунів з інтегрованими ПЧ (компактні двигуни).

Область застосування регульованих ЕП досить велика: від великої електроенергетики [34, 35, 36] до різних сфер комунального та побутового господарства [37, 38, 39]. Використання регульованих електроприводів

дозволяє знизити споживання електроенергії на 20-50% за рахунок використання механізмів, в яких двигуни розраховані на максимальне навантаження, а середньодобове навантаження становить 60-80%. При цьому поліпшуються умови роботи двигунів і механізмів в цілому завдяки виключенню динамічних ударів, пускових перевантажень і обмеження струму в обмотках двигуна. Таким чином, застосування регульованих електроприводів дозволяє створити нову технологію енергозбереження, використання якої не тільки економить електричну енергію, а й збільшує термін служби обладнання.

Дослідженню всіляких характеристик ЕП на базі двигуна постійного струму присвячена велика якість робіт [40 - 42 та ін.]. Іноземні та українські компанії і по теперішній час продовжують використовувати приводи постійного струму, закладаючи в них все нові можливості для регулювання. Раніше електроприводи постійного струму не мали серйозних конкурентів в області регульованих ЕП [43], однак при їх використанні виявлялися серйозні недоліки:

- складна конструкція і велика маса;
- критичний у експлуатації щітковий апарат;
- висока вартість.

Електроприводи змінного струму до 1980-х років були широко поширені, надійні, дешеві, мали хороші експлуатаційні якості, але віднести їх до регульованих електроприводів було не можна. Зміна числа пар полюсів (багатошвидкісні двигуни), введення додаткових резисторів (у АД з фазним ротором) і т.п. не могли забезпечити безступінчатого регулювання швидкості. А головне, за допомогою цих способів неможливо було досягти необхідної якості більшості технологічних процесів. Ще один недолік таких систем управління - висока ціна.

В даний час поява нової елементної бази та використання сучасних засобів мікропроцесорної техніки дозволяє розробникам створювати компактні, багатофункціональні і високоефективні системи управління ЕП змінного

струму, які задовольняють вимогам більшості технологічних процесів [44, 45, 46]. До переваг таких систем управління можна віднести:

- якісне управління швидкістю;
- високий момент при низьких швидкостях;
- низькі втрати і високу ефективність;
- високі динамічні характеристики;
- стабільну роботу з потужними двигунами.

Певний ривок відбувся і в області створення самих асинхронних двигунів - так, наприклад, енергозберігаючі електродвигуни фірми «Siemens» в порівнянні зі звичайними електродвигунами мають [47]:

- підвищений термін служби за рахунок меншої температурної навантаження;
- більш високий ККД за рахунок застосування якісної сталі і активних матеріалів), поліпшених систем охолодження і підшипникових вузлів;
- менші втрати і знижені шуми.

За рахунок економії електроенергії, навіть з урахуванням відносно низькою її вартості, за найскромнішими підрахунками, дані електродвигуни окупаються за 1-2 роки. Вартість самого двигуна при роботі 2000 годин щорічно протягом 10 років становить менше 3% від загальних витрат на нього. Частка витрат на електроенергію - близько 95%. Витрати на монтаж і технічне обслуговування - 2%.

Велику ефективність цих двигунів забезпечила модульна збірна конструкція: модулі електромеханічного гальма, енкодера і вентилятора примусового охолодження дозволили перетворити стандартний асинхронний двигун в багатофункціональну машину.

Українськими виробниками також проводяться дослідження щодо вдосконалення серійних асинхронних машин [48, 49]. Відповідно до вимог ринку освоюються нові виробництва електричних машин з покращеними технічними, експлуатаційними та економічними характеристиками, а також

ряду спеціальних машин, які дозволяють вирішувати на практиці будь-яке завдання побудови ефективного комплектного електроприводу.

Вельми перспективна розробка - синхронний двигун з порушенням від постійних магнітів, так званий вентильний двигун (ВД), який має підвищені потужність і крутний момент, а також меншу масу і об'єм, ніж АД з редуктором [50, 51, 52]. Недоліком постійних магнітів з високою коерцитивною силою є їх чимала вартість.

Ще однією перспективною розробкою є привід з вентильно-індукторним двигуном (ВИД) - силова версія одного з типів крокового двигуна (ШД) [34, 43, 53]. Його принципова відмінність від великого числа вже розроблених і використовуваних в верстатах, роботах і т.п. електроприводів, побудованих на двигунах з постійними магнітами, синхронних, реактивних та інших спеціальних двигунах, є гранична простота конструкції, низька вартість і висока надійність машини і системи в цілому. Даний напрямок отримав розвиток в 80-х роках минулого століття і дозволило науці зайняти передові позиції в області теорії і практики ВИД [38, 54].

Проведений огляд наукової літератури показав, що сучасний етап розвитку ЕП характеризується активним застосуванням регульованого приводу змінного струму, який є найперспективнішим, надійним і економічно вигідним способом перетворення електричної енергії в механічну енергію. Велика частина робіт присвячена дослідженню і оптимізації ЕП на базі АД з короткозамкненим ротором, що пояснюється їх поширеністю в загальнопромислових механізмах. Регульовані електроприводи з перетворювачами частоти дозволяють оптимізувати роботу механізмів в різних режимах і забезпечують плавний пуск, безступінчасте регулювання швидкості обертання і роботу механізму з необхідною швидкістю, безконтактний реверс, рівномірне обертання валу електродвигуна в зоні низьких частот, високі електричні показники електроприводу (ККД, коефіцієнт потужності) .

З практики застосування на підприємствах впливає наступне [55, 56 та ін.]:

- використання частотних перетворювачів на об'єктах нафтової промисловості дозволяє економити до 65% електроенергії,
- частотне регулювання приводів насосного обладнання забезпечує до 40% економії електроенергії,
- насоси з вбудованим електронним регулюванням приводу дають можливість скоротити витрату електроенергії на 50%,
- впровадження частотно-регульованих електроприводів на насосних станціях в житлово-комунальному господарстві знижує електроспоживання майже на 60%, зменшує витрату води на 25%, усуває гідроудари, що руйнують систему постачання,
- перехід до частотно-регульованого електроприводу в ліфтових підйомниках знижує витрату електроенергії на 50-60%, збільшує надійність роботи кінематичної схеми ліфтів завдяки обмеженню ударних моментів в перехідних режимах експлуатації підйомників, забезпечує дотримання ергономічних вимог щодо обмеження ривків і прискорень, дозволяє використовувати більш дешеві одношвидкісні асинхронні двигуни,
- застосування частотно-регульованих приводів в підйомно-транспортних механізмах покращує енергетичні характеристики електроприводів в порівнянні з параметричними перетворювачами і реостатним регулюванням, підвищує швидкість і якість регулювання швидкості, забезпечує плавність пуску і гальмування механізмів, підвищує комфортність управління ними, забезпечує збереження вантажу, запобігає від різких поштовхів, що дозволяє значно продовжити термін служби всіх механічних елементів крана.

Разом з великою кількістю переваг частотно-регульований привід має і недоліки: більшість його моделей є джерелом електромагнітних завад, а частотно-регульовані приводи великої потужності порівняно дорогі.

Економія електроенергії при впровадженні перетворювачів частоти коливається від 15 до 85%. Найбільший ефект від використання частотно-регульованих приводів проявляється при їх включенні в автоматизовані

системи управління технологічними та виробничими процесами. Корисні перетворювачі частоти є як ланка управління технологічним процесом [57].

Дослідження і моделювання паралельної роботи відцентрових насосів з регульованою частотою обертання в роботі [58] дозволяє зробити наступні висновки:

- для електроприводу насосна установка служить навантажувальним механізмом. Врахування особливостей навантаження багато в чому визначає ефективність електроприводу. Особливістю насосів як навантажувальних машин електроприводу є, по-перше, вентиляторна характеристика машин електроприводу; по-друге, відносна частота обертання для регулювання напору або витрати перекачується;

- сучасні частотно-регульовані перетворювачі здатні точно регулювати частоту обертання синхронних і асинхронних електродвигунів спеціального та загальнопромислового виконання в широкому діапазоні частот обертання. Промисловістю випускаються компактні і надійні перетворювачі частоти, спеціально призначені для насосних установок. Вони з успіхом реалізують функцію регулювання частоти обертання насосів потужністю від одиниці до сотень і тисяч кіловат;

- контроль за роботою циркуляційних насосів в умовах експлуатації на ТЕС може здійснюватися по їх напору, наприклад на рівні заданого. Це дозволяє компенсувати зміни режимів роботи систем технічного водопостачання, пов'язаних з навантаженням або забрудненням гідроспоруд ТЕС.

- із застосуванням частотно-регульованих перетворювачів на насосній станції натиск і подача перекачуваного середовища може регулюватися двома способами:

1. Одночасною зміною частоти обертання паралельно включених насосів;
2. Зміною частоти обертання тільки одного з паралельно включених насосів;

- незалежно від числа насосів на насосній станції з метою застосування тільки одного частотно-регульованого перетворювача раціонально застосовувати перший спосіб для регулювання частоти обертання насосів з однаковими характеристиками. Витрата і натиск через однакові насоси будуть рівними. Другий спосіб доцільно використовувати на насосних станціях з різними насосами. Потужність частотно-регульованого перетворювача на станції з однаковим насосами повинна бути дорівнювати сумарній потужності встановлених електродвигунів. На насосній станції з різними насосами потужність частотно-регульованого перетворювача повинна дорівнює потужності найбільшого електродвигуна [58].

1.3. Математичні моделі синхронної машини, дизельної електростанції та асинхронного двигуна з частотним регулюванням

1.3.1. Синхронна машина

Синхронні машини застосовують у багатьох галузях народного господарства, зокрема, в якості генераторів в пересувних і стаціонарних електричних станціях, двигунів в установках, що не вимагають регулювання частоти обертання або потребують постійної частоті обертання.

Найбільш поширена конструктивна схема синхронної машини з обертовим ротором, на якому розташовані явно виражені полюси. Іноді явно-полюсні синхронні машини малої потужності (до 15 кВт) виконують за конструктивною схемою машин постійного струму, тобто з полюсами, розташованими на статорі, колектор замінюється контактними кільцями.

В даний час для вивчення і дослідження електроенергетичних систем використовують комп'ютерне моделювання. Оскільки синхронні генератори є джерелами електроенергії в складі електроенергетичних систем, їх точний математичний опис і грамотна комп'ютерна реалізація має важливе значення при моделюванні цих систем [59].

Застосування спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє спростити задачу створення комп'ютерної моделі електроенергетичної системи. Одним з таких пакетів для моделювання електротехнічних пристроїв і систем,

зокрема синхронного генератора, є середовище Simulink з бібліотекою блоків Sim Power Systems []. Бібліотека SimPower Systems містить набір блоків для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв. До складу бібліотеки входять моделі пасивних і активних електротехнічних елементів, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, ліній електропередачі і т.п. обладнання. Є також розділ, що містить блоки для моделювання пристроїв сигової електроніки, включаючи системи управління для них. Використовуючи спеціальні можливості Simulink і SimPower Systems, можливо не тільки імітувати роботу пристроїв в тимчасовій області, а й виконувати різні види аналізу таких пристроїв [59, 60,61].

Таким чином, SimPower Systems в складі Simulink в даний час може вважатися одним з кращих пакетів для моделювання електроенергетичних систем. Математична модель синхронної машини, представлена в середовищі Simulink (додаток Sim Power System), є класичною моделлю синхронної машини з демпферними обмотками. Напрямок обертання ротора прийнято за годинниковою стрілкою.

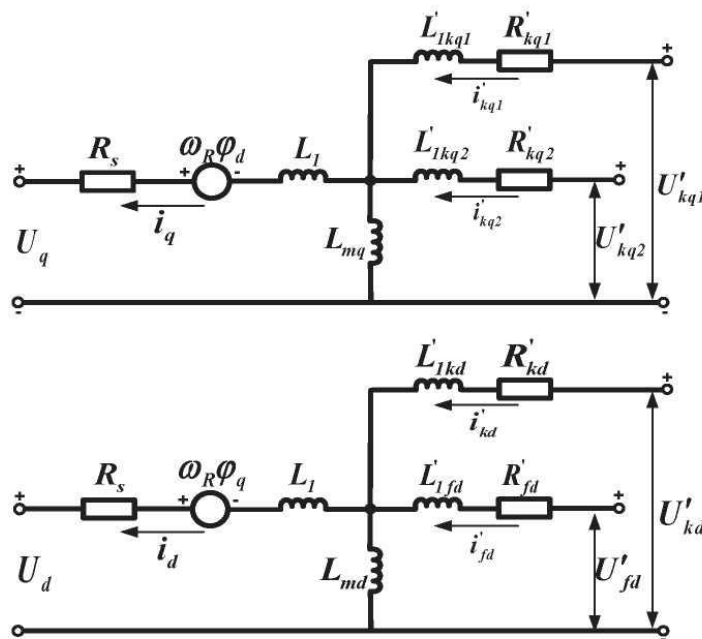


Рис. 1.2. Схема заміщення СМ в системі координат, пов'язаної з ротором (осі q-d), використана при створенні моделі в середовищі Simulink

Математична модель синхронного генератора, реалізована в середовищі MatLab/Simulink, складається з системи диференціальних рівнянь 6-го порядку для напруг і системи алгебраїчних рівнянь для розрахунку потокозчеплення. У загальному випадку, ротор синхронної машини має обмотку збудження і одну або більше демпферних обмоток. Крім того, всі обмотки ротора мають різні електричні характеристики.

Електричні рівняння напруги виходять на основі закону Кірхгофа в фазній системі координат ротора [62, 63].

Рівняння напруги статора:

$$U_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_R \psi_q, \quad (1.1)$$

$$U_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \psi_q - \omega_R \psi_d, \quad (1.2)$$

Рівняння напруги обмотки збудження:

$$U_{fd}' = R_{fd}' i_{fd}' + \frac{d}{dt} \psi_{fd}' \quad (1.3)$$

• Рівняння демпферних обмоток:

$$U_{kd}' = R_{kd}' i_{kd}' + \frac{d}{dt} \psi_{kd}' \quad (1.4)$$

$$U_{kd1}' = R_{kd1}' i_{kd1}' + \frac{d}{dt} \psi_{kd1}', \quad (1.5)$$

$$U_{kd2}' = R_{kd2}' i_{kd2}' + \frac{d}{dt} \psi_{kd2}', \quad (1.6)$$

Тут $\psi_d, \psi_q, \psi_{fd}', \psi_{kd}', \psi_{kd1}', \psi_{kd2}'$ - відповідно потокозчеплення по поздовжній і поперечній осях (d, q), потокозчеплення обмотки збудження і потокозчеплення демпферних обмоток синхронної машини, розраховані за допомогою системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned}
\psi_d &= L_d i_d + L_{md} (\dot{i}_{fd} + \dot{i}_{kd}); \\
\psi_q &= L_q i_q + L_{md} \dot{i}_{kq}; \\
\psi_{fd} &= L_{fd} \dot{i}_{fd} + L_{md} (i_d + \dot{i}_{kd}); \\
\psi_{kd} &= L_{kd} \dot{i}_{kd} + L_{md} (i_d + \dot{i}_{fd}); \\
\psi_{kd1} &= L_{kd1} \dot{i}_{kd1} + L_{md} i_q; \\
\psi_{kd2} &= L_{kd2} \dot{i}_{kd2} + L_{md} i_q.
\end{aligned} \tag{1.7}$$

Тут представлені наступні параметри:

ω_R - кутова швидкість обертання ротора;

U_d - напруга статора (якірної обмотки) по поздовжній осі d;

U_q - напруга статора (якірної обмотки) по поперечній осі q;

i_d - струм статора по осі d;

i_q - струм статора по осі q;

U_{fd} - напруга обмотки збудження;

$\dot{i}_{fd}$ - струм в обмотки збудження;

U_{kd}, U_{kq1}, U_{kq2} - напруги демпферних обмоток по осях d і q;

$\dot{i}_{kd}, \dot{i}_{kq1}, \dot{i}_{kq2}$ - струми демпферних обмоток по осях d і q;

R - активний опір фази статора;

L_d, L_q - індуктивність якірної обмотки по осях d і q;

L_{md} - взаємні індуктивності між обмотками по осях d і d;

R_{fd} - активний опір обмотки збудження;

L_{fd} - індуктивність обмотки збудження;

R_{kd}, R_{kq1}, R_{kq2} - активні опору демпферних обмоток по поздовжній і поперечній осях d і q;

L_{kd}, L_{kq1}, L_{kq2} - індуктивність демпферних обмоток по поздовжній і поперечній осях d і q;

Рівняння (1.1) - (1.7) описують еквівалентну схему електричної частини синхронного генератора. Схема заміщення показана на рис. 1.2.

Механічна частина синхронної машини представлена наступною системою рівнянь [62, 83]:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2J}(T_m - T_e - K_d\Delta\omega), \quad (1.8)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega + \omega_0, \quad (1.9)$$

де $\Delta\omega$ - відхилення швидкості ротора від синхронної швидкості;

J - момент інерції ротора;

T_m - механічний момент;

T_e - електромагнітний момент;

K_d - коефіцієнт демпфірування;

$\omega(t)$ - кутова швидкість ротора;

ω_0 - синхронна швидкість (1 о. Е.).

На рис. 1.3 представлена структурна схема механічної частини моделі синхронної машини.

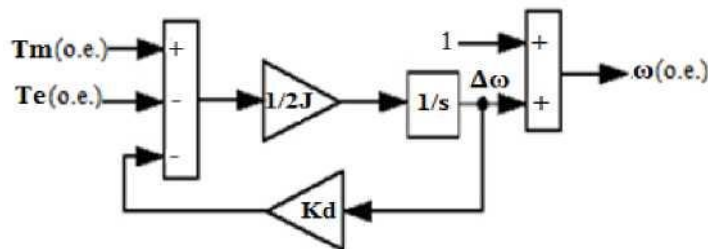


Рис. 1.3. Механічна частина синхронної машини [62]

На структурній схемі добре видно, що в моделі СМ обчислюється відхилення швидкості ротора від синхронної, а не саме значення швидкості.

1.3.2. Дизельна електростанція

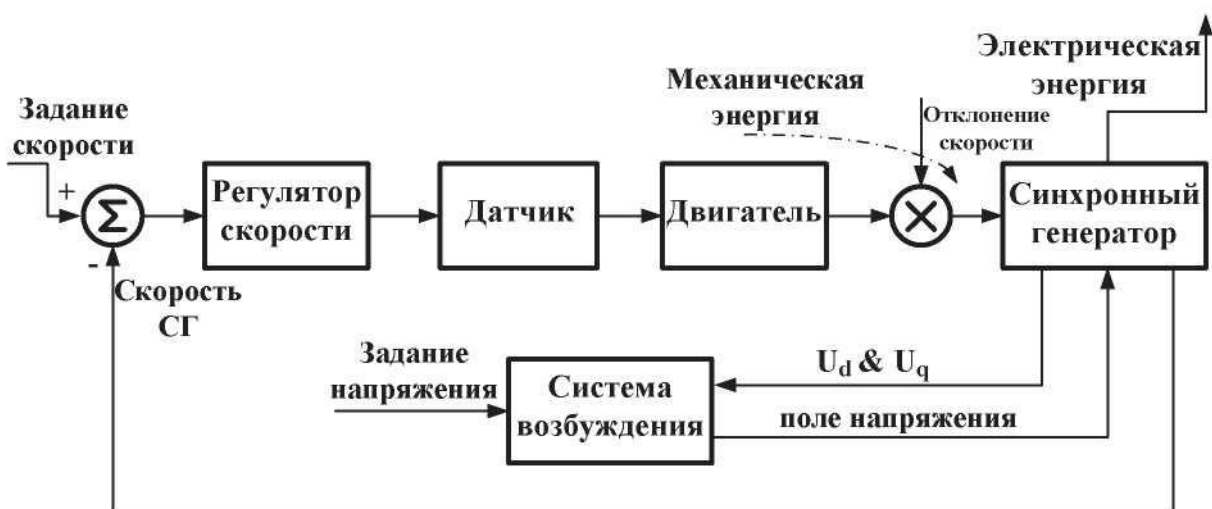
Невелика частина території України, що має малу щільність населення, що не приєднана до централізованих електроенергетичним системам. До таких територій відноситься гірські території (середня щільність населення - 91,16 чол. / км), острівні території та деякі інші райони. Такі райони отримують електроенергію від автономних дизель-генераторних установок невеликої

потужності, вітроенергетичних установок, малих ГЕС і деяких інших відновлюваних джерел енергії [64].

У цьому розділі представлений короткий огляд деяких з опублікованих робіт по розподіленню генерації, з використанням математичної моделі дизель-генераторної установки. У роботах [65, 66, 67] така установка є гібридною конфігурацією, що складається з системи вітро-дизельної електростанції, розробленої Hydro-Quebec, спрямованої на зниження вартості електроенергії у віддалених районах. Ця модель використовується для аналізу взаємодії вітрової і дизельної електростанцій для того, щоб поліпшити використання енергії вітру вітроелектричної установки, підвищити економію палива і загальну ефективність дизельної електростанції. Дослідження здійснюється за двома сценаріями залежно від швидкості вітру: в першому на низьких швидкостях вітру дизельний генератор повинен жити навантаження, а на другому випадку, коли енергія вітру перевищує вимога навантаження, можна вимкнути дизельний генератор.

Є кілька публікацій про дизельні генератори з використанням синхронного генератора. Описано в деяких джерелах два типи дизельних двигунів: двотактний і чотиритактний [68, 69]. Деякі роботи використовували математичну модель дизельного генератора для дослідження електричної мережі з розподіленою генерацією (LN Hannet, GeorgeJee, B. Fardanesh, WI Rowen, PM Anderson, M. Mirheydar, KE Yeager, JR Willis, VF Filreker, і т.д.) [70 - 81].

Основні компоненти системи дизель-генераторних установок: двигун, регулятори, система збудження і синхронний генератор. Далі дано короткий



опис кожного компонента, тобто докладне моделювання дизельного двигуна і синхронного генератора.

Рис.1.4. Блок-схема дизельних електростанцій [65]

Загальна блок-схема дизельного генератора з регулятором і синхронною машиною показана на рис. 1.4. Різниця швидкості або частоти обертання двигуна дає сигнал, що управляє, в результаті чого зміниться момент первинного двигуна. Дизельний двигун створює крутний момент і механічна потужність буде дана наступним рівнянням (1.10).

$$P_M = \omega \cdot T_e, \quad (1.10)$$

де P_M - механічна потужність (параметр в відносних одиницях - в.о.)

ω - кутова швидкість обертання ротора (в в.о.)

T_e - крутний момент двигуна (в в.о.)

Математична модель дизельного двигуна показана на рис. 1.5.

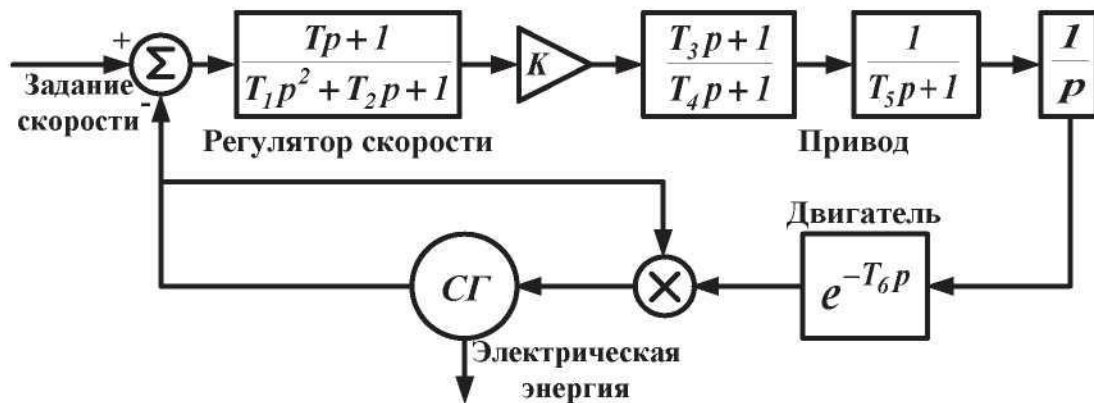


Рис.1.5. Математична модель дизельного двигуна [65]

Регулятор швидкості діє на сигнал відхилення швидкості і призначений для підтримки заданого швидкісного режиму дизельного двигуна. Він є основним засобом управління для дизельного двигуна під навантаженням. Управління швидкістю, як правило, моделюються за допомогою передавальної функції випередження-запізнювання [82, 83], або ПД - регулятора. У цій роботі, передавальна функція випередження-запізнювання була використана, щоб представити швидкодію контролера, як показано на рис. 1.4. На цьому рис. K - коефіцієнт підсилення регулятора швидкості, $p=d/dt$ оператор диференціювання (оператор Лапласа), T , T_1 , T_2 - постійні часу регулятора

швидкості, T_3 , T_4 , T_5 є постійними часу для приводу, T_6 є час затримки двигуна у виході на механічну енергію синхронного генератора.

Модель системи збудження.

Основною метою управління системи збудження є підтримка напруги генератора. Загальна схема системи збудження простої моделі синхронної машини показана на рис. 1.6.

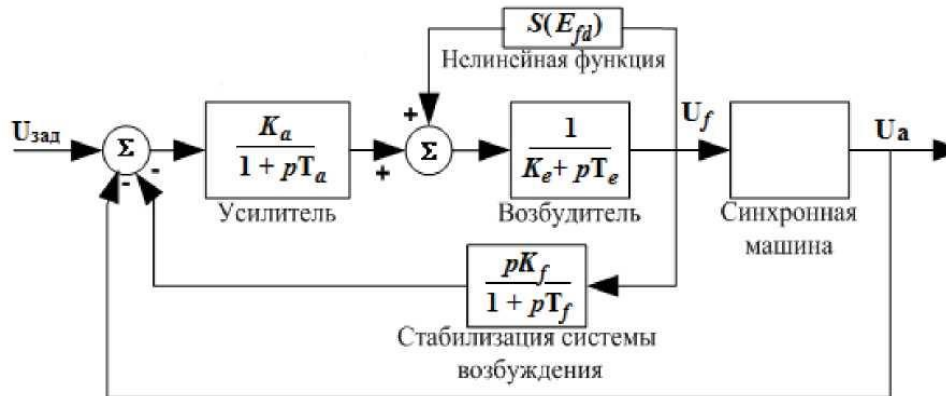


Рис. 1.6. Загальна блок-схема системи збудження постійного струму [82, 83]

K_a - Коефіцієнт посилення регулятора,

T_a - Постійна часу регулятора,

K_e - Коефіцієнт посилення збудника,

T_e - Постійна часу збудника,

K_f - Коефіцієнт посилення стабілізатора зворотного зв'язку,

T_f - Постійна часу стабілізатора зворотного зв'язку.

1.3.3. Асинхронний електропривод з частотним регулюванням

Для математичної моделі частотно-регульованого асинхронного приводу зазвичай використовуються узагальнена система диференціальних рівнянь для опису асинхронної машини змінного струму [84, 85, 86], отримані при загальноприйнятих припущеннях: без урахування втрат в сталі і насичення магнітного кола, при рівномірному повітряному зазорі і живленні двигуна системою симетричних синусоїдальних напруг.

Узагальнена система рівнянь для опису асинхронної машини при обертанні координат з довільною кутовою швидкістю набирає вигляду рівнянь системи (1.11):

$$\begin{cases} \vec{U}_S = R_S \vec{i}_S + d\vec{\psi}_S/dt + j\omega_K \vec{\psi}_S \\ \vec{U}_R = R_R \vec{i}_R + d\vec{\psi}_R/dt + j(\omega_K - z_p \omega) \vec{\psi}_R \\ \vec{\psi}_S = L_S \vec{i}_S + L_m \vec{i}_R \\ \vec{\psi}_R = L_m \vec{i}_S + L_R \vec{i}_R \end{cases} \quad (1.11)$$

де $\vec{U}_S, \vec{i}_S, \vec{\psi}_S$ – комплексні вектори напруги, струму і потокозчеплення статора; $\vec{U}_R, \vec{i}_R, \vec{\psi}_R$ – комплексні вектори напруги струму і потокозчеплення ротора; L_S, L_R – власні індуктивності статора і ротора; L_m – взаємне індуктивність між статором і ротором; R_S, R_R – активні опори обмотки і роторної обмотки; z_p – число пар полюсів [63].

Для плавного і глибокого регулювання кутової швидкості різних виробничих механізмів в даний час широко застосовуються асинхронні двигуни (АД) з векторним керуванням [62, 63, 86].

Векторне управління частотно-регульованого АД пов'язано як зі зміною частоти і поточних значень змінних АТ, так і з взаємною орієнтацією їх векторів в полярній або декартовій системах координат. Регулюванням амплітудних значень змінних і кутів між їх векторами реалізується повне управління АТ як в статиці, так і в динаміці, забезпечуючи тим самим помітне поліпшення перехідних процесів в порівнянні зі скалярним керуванням.

Інформація про поточні значення і просторовому положенні змінних АТ може бути отримана як прямим їх вимірюванням за допомогою відповідних датчиків, так і побічно на основі математичної моделі АД [86].

Якщо рівняння системи (1.11) подати в ортогональній системі координат (х-у), що обертається в просторі в загальному випадку з довільною кутовою швидкістю ω_K , то для АД з короткозамкненим ротором (при $\vec{U}_R = 0$), використовуючи тільки вектори $\vec{\psi}_R$ і $\vec{i}_S$ можна отримати наступну систему рівнянь з урахуванням виразів для моментів [86-89]:

$$\begin{aligned}
U_{SX} &= r i_{SX} + L_s \frac{di_{SX}}{dt} - L_s \omega_1 i_{SY} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{RX} - k_R z_p \omega \psi_{RY} \\
U_{SY} &= r i_{SY} + L_s \frac{di_{SY}}{dt} - L_s \omega_1 i_{SX} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{RY} - k_R z_p \omega \psi_{RX} \\
0 &= -K_R R_R i_{SX} + \frac{1}{T_R} \psi_{RX} \frac{d\psi_{RX}}{dt} + (\omega_1 - z_p \omega) \psi_{RY} \\
0 &= -K_R R_R i_{SY} + \frac{1}{T_R} \psi_{RY} \frac{d\psi_{RY}}{dt} + (\omega_1 - z_p \omega) \psi_{RX} \\
M_{em} &= \frac{3}{p} K_R (\psi_{RX} i_{SY} - \psi_{RY} i_{SX}); \quad J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c
\end{aligned} \tag{1.12}$$

де:

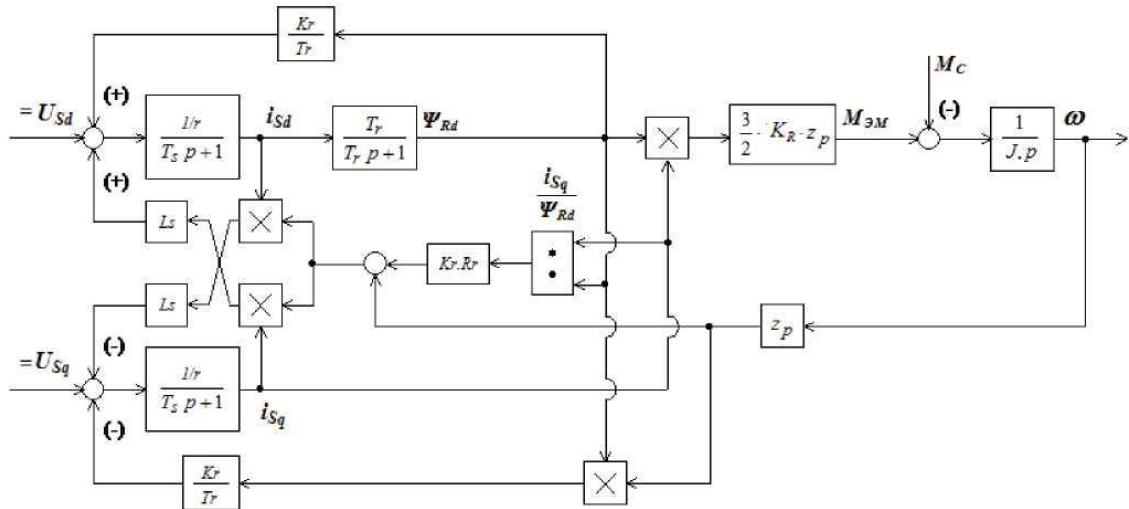
$$\begin{aligned}
r &= (R_s + K_R^2 R_R); \\
L_s &= L_s - \frac{L_M}{L_R}; \\
K_R &= \frac{L_M}{L_R}; \\
T_R &= \frac{L_R}{L_R}.
\end{aligned}$$

Якщо вісь x в системи координат, що обертається, буде зорієнтована за напрямком вектора поточкозчеплення ротора ψ_R тоді, $|\vec{\psi}_R| = \psi_{RX} = \psi_{Rd}$, а $\psi_{Rq} = \psi_{RY} = 0$. У цьому випадку після перетворень по Лапласа система рівнянь (1.12) набирає вигляду:

$$\begin{cases}
U_{Sd} = r(1 + T_s p) i_{Sd} - L_s \omega_1 i_{Sq} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rd} \\
U_{Sq} = r(1 + T_s p) i_{Sq} - L_s \omega_1 i_{Sd} + k_R z_p \omega \psi_{Rd} \\
K_R R_R i_{Sd} = \frac{1}{T_R} (1 + T_s p) \psi_{Rd} \\
K_R R_R i_{Sq} = (\omega_1 - z_p \omega) \psi_{Rd} \\
M_{EM} = \frac{3}{2} z_p K_R \psi_{Rd} i_{Sq}; \quad J \cdot p \omega = M_{EM} - M_c
\end{cases} \tag{1.13}$$

де $T_s = L_s / r$; $p = d / dt$ - оператор Лапласа.

Системі рівнянь (1.13) відповідає наведена на рис. 1.7 структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, виконана в системі координат $d-q$, під обертається, орієнтований за результуючим вектором потокозчеплення ротора.



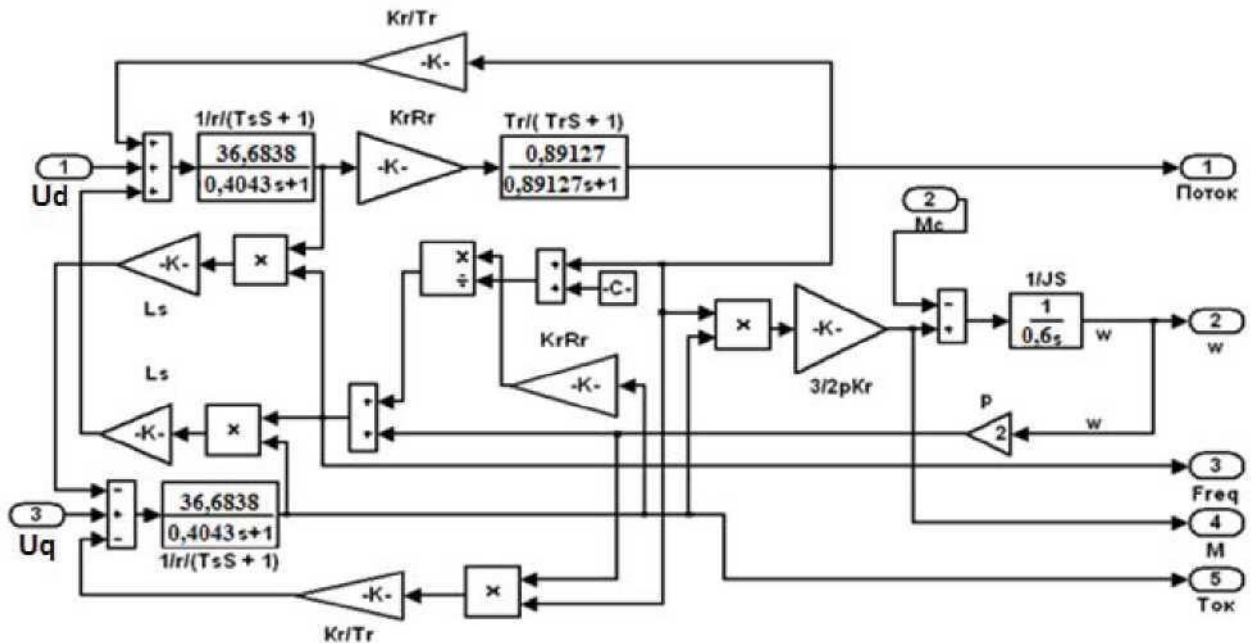


Рис. 1.9. Математична модель АД з АІН в системі координат $d-q$, що обертається

У порівнянні результатів моделювання математичної моделі узагальненої асинхронної машини і моделі на базі віртуальної асинхронної машини (в бібліотеці Sim Power Systems) можна сказати, що перехідні процеси швидкості і моменту при пуску, динамічні механічні характеристики, а також природні механічні характеристики абсолютно ідентичні. Це доводить, що блок віртуальної асинхронної машини в своїй структурі має математичні рівняння узагальненої асинхронної машини.

Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи використовують блочно-модульні принципи комплектування і реалізуються за структурами скалярного і векторного частотного управління. Вибір структури реалізації та закону управління частотно-регульованого асинхронного електроприводу для конкретного виробничого механізму визначається вимогами до статичних (в першу чергу до діапазону регулювання швидкості) і динамічних характеристик електроприводу [89].

1.4. Постановка завдання дослідження

При підключенні підприємств, насосних станцій, і т.д. до електричної мережі виникає залежність цих споживачів від електричної мережі, стабільність працездатності електричної мережі впливає на економічну ефективність підприємства. Проблема є актуальною для умов віддалених районів України, що має безліч одиниць електроприводу насосів для перекачування води з метою зрошення, асинхронні електроприводи типових виробничих механізмів. В цьому випадку актуальне використання частотного регулювання електроприводу для економії електроенергії і підвищення стабільності роботи насосів. Масове використання частотно-регульованого електроприводу істотно змінить властивості і режими роботи систем електропостачання, що постачають електроенергією цих споживачів, особливо при наявності в системі електропостачання установок розподіленої генерації. Після аварійного відключення основного пункту живлення від СЕС, розподілена генерація може відновити електропостачання для частини споживачів.

Розробка моделей і дослідження динамічної поведінки системи електропостачання з розподіленою генерацією і масовим електроприводом при нормальних, пускових та аварійних режимах є метою роботи. У відповідності з цією метою повинні бути сформульовані і вирішені наступні завдання:

1. Розробка моделей системи електропостачання з частотно-регульованим електроприводом і установками розподіленої генерації;
2. Дослідження впливу різних чинників при моделюванні нормальних і перехідних режимів систем електропостачання з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом;
3. Дослідження динамічних режимів складної системи електропостачання віддаленого району при масовому пуску асинхронних двигунів і в аварійних ситуаціях;

4. Дослідження динамічної поведінки системи електропостачання віддаленого району з розподіленою генерацією і масовим використанням ЧРЕП.

Висновки до розділу 1

У першому розділі наведено огляд сучасного стану використання розподіленої генерації і частотно-регульованого електроприводу. Так, енергетична криза сімдесятих років XX століття призвела до того, що в західних країнах перестала спостерігатися тенденція до максимальної централізації електропостачання. З цього періоду почала інтенсивно розвиватися розподілена генерація. Джерела розподіленої генерації базуються на енергетичних установках, що використовують процеси спалювання палив (дизельні, міні газотурбінні і парогазові установки, на біомасі та ін.), а також поновлювані природні ресурси (міні-ГЕС, вітроустановки і ін.). При роботі в системі розподілена генерація підключається на середніх напругах (6-10-35 кВ) в розподільній мережі.

При підключенні систем частотно-регульованого електроприводу в системі електропостачання з розподіленою генерацією виникають проблеми забезпечення працездатності СЕП у всіх можливих станах (режимах) - нормальних, ремонтних, аварійних і після аварійних. Для оцінки цих впливів повинні бути розглянуті аварійні ситуації в системах електропостачання з розподіленою генерацією. Вирішення цих завдань має ряд специфічних особливостей, однією з яких є моделювання динамічних характеристик обладнання в системі електропостачання.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ MATLAB / SIMULINK

2.1 Моделювання системи електропостачання з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом

В даний час існує декілька десятків графічних середовищ для візуального моделювання, але для моделювання систем електропостачання, більш докладно з можливостями інтегрованих комплексів моделювання з використанням методів графічного (візуального) програмування можна використовувати програмний пакет MATLAB / SIMULINK [90, 91].

Розроблено імітаційну модель системи електропостачання з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом, яка реалізована в програмному пакеті MATLAB. Модель дозволяє отримати динамічні характеристики асинхронного двигуна, синхронної машини, дизельної електростанції, навантаження і дослідити поведінку системи електропостачання в нормальних і аварійних режимах роботи. Математичні моделі елементів системи електропостачання, частотно-регульованого електроприводу і розподіленої генерації докладно представлені в додатках А, Б і В.

Останнім часом споживачі, які мають асинхронний електропривод, все більш активно використовують його частотне регулювання, що підвищує ефективність роботи асинхронного електроприводу [105, 106, 110]. Для ЧРЕП характерні специфічні особливості динаміки поведінки в перехідних процесах і потрібно вивчити механічні характеристики виробничих механізмів електроприводу.

Залежність між приведеними до валу двигуна швидкістю і моментом опору механізму $\omega = f(M_{MEH})$ називають статичною механічною характеристикою виробничого механізму [92].

Виробничим механізмом або робочою машиною називається пристрій, призначений для зміни форми, властивостей, стану і положення предмета праці

і також для виконання корисної роботи електроприводу в процесі реалізації технологічної операції. Тому розгляд різних типів механізму є важливою частиною оцінки роботи асинхронних двигунів, які використовуються в сільськогосподарському виробництві.

Різні виробничі механізми мають різні механічні характеристики. Однак можна отримати деякі узагальнюючі висновки, якщо скористатися наступною емпіричною формулою для механічної характеристики виробничого механізму [92, 93]:

$$M_{MEX} = k_z \left[M_{CT} + (M_H - M_{CT}) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^a \right], \quad (2.1)$$

де $k_z = \frac{M}{M_H}$ - коефіцієнт завантаження; $M_{CT} = M_{MEX}(0)$ - статичний момент опору; M_H - номінальний момент; ω - швидкість обертання ротора; ω_H - номінальна швидкість обертання ротора; a - показник ступеня, що залежить від типу механізму.

Для підйомних кранів, кульових млинів, дробарок і поршневих компресорів $a = 0$ і при цьому момент опору виробничого механізму не залежить від швидкості

$$M_{MEX} = k_z M_H = const$$

Для повітродувок $M_{CT} = 0$, $a = 2$ і залежність моменту опору виробничого механізму набуває такого вигляду:

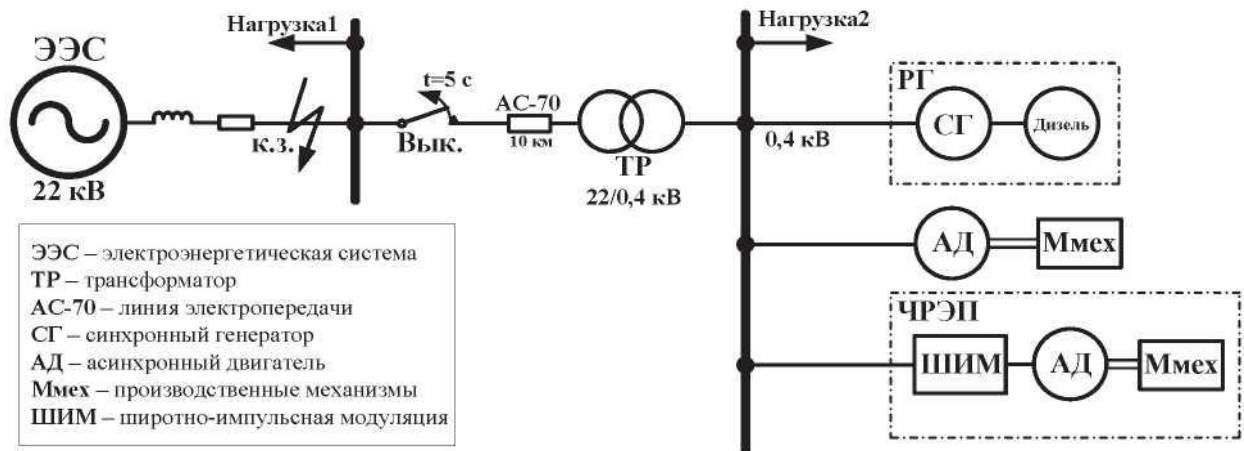
$$M_{MEX} = k_z M_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2$$

Для насосів $M_{CT} = (0,3...0,7)M_H$, $a = 2$ і при цьому момент опору виробничого механізму має вигляд [93]:

$$M_{MEX} = k_z \left[M_{CT} + (M_H - M_{CT}) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 \right]$$

В якості тестової схеми взята проста система електропостачання, що включає основний пункт живлення, дизель-генераторну установку, що представляє розподілену генерацію, і частотно-регульований електропривод

(див. рис. 2.1). Модель тестової схеми і результати чисельних досліджень дані нижче. Реалізація сформованої математичної моделі і чисельні дослідження



виконані засобами MATLAB / SIMULINK [82, 83].

Рис. 2.1. Тестова схема

На рис. 2.2 і 2.3 представлені розроблені за допомогою пакета SimPowerSystem моделі системи електропостачання для тестової схеми.

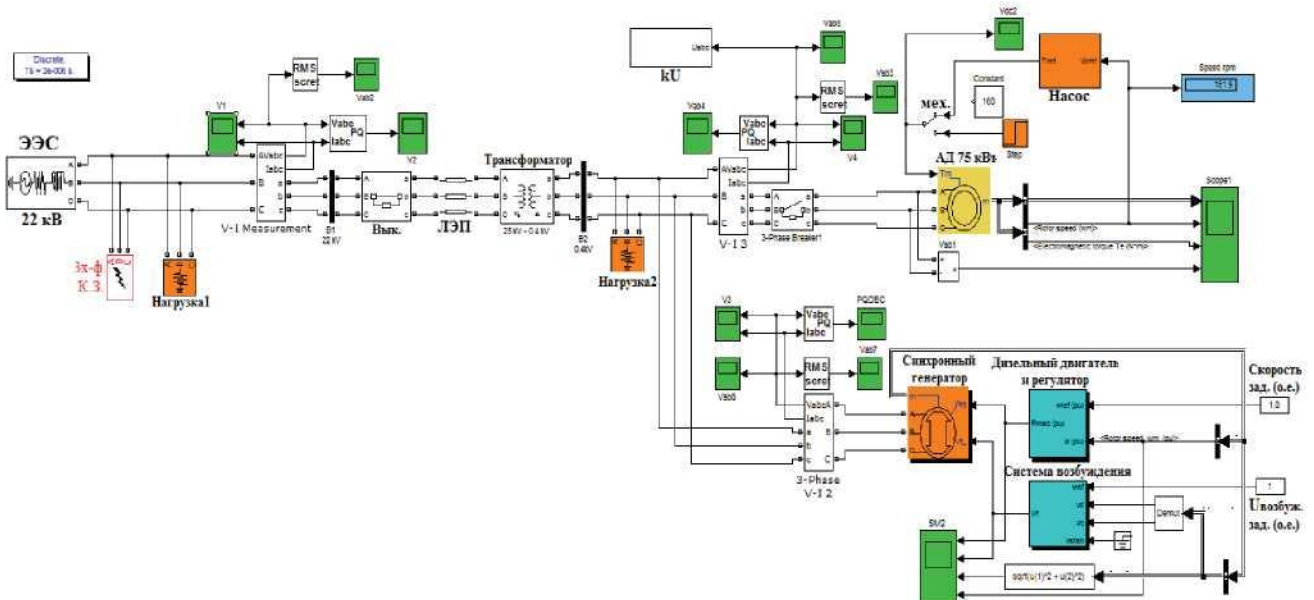


Рис. 2.2. Модель системи електропостачання з нерегульованим АД в пакеті MATLAB

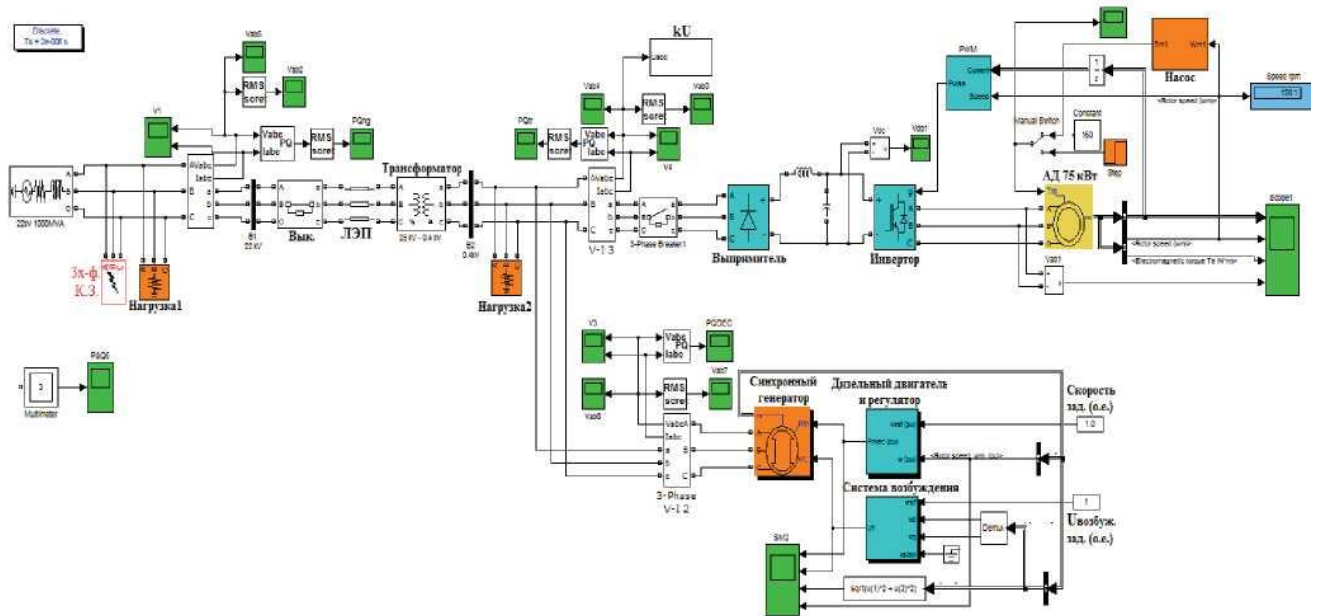


Рис. 2.3. Модель системы электропоставки з РГ і ЧРЕП в пакеті MATLAB

У моделі використовуються наступні основні блоки:

- для реалізації зовнішнього джерела напруги використовувався блок *Three-Phase Source* (трифазний джерело напруги) з напругою 22 кВ, частотою 50 Гц, потужністю КЗ 10 МВ -А;
- трансформатор (Tr) моделювався блоком *Three-Phase Transformer (Two Windings)* - трифазний двообмотковий трансформатор, параметри якого представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри трансформаторів

Напруга первинної обмотки U_1	22000	В
Напруга вторинної обмотки U_2	400	В
Номінальна повна потужність S_{HT}	400000	ВА
Опір кола намагнічування R_μ	200	о.е.
Індуктивність ланцюга намагнічування L_μ	200	о.е.
Активний опір обмотки R_1, R_2	0,015	о.е.
Індуктивність обмотки L_1, L_2	0,065	о.е.

- Випрямляч, що живить інвертор через зв'язок постійного струму, моделювався блоком *Universal Bridge (Diode bridge)* - трифазний випрямляч

- Інвертор використовується як джерело змінної частоти змінного напруги для живлення АД, використовуючи блок *Universal Bridge (IGBT/Diode bridge)* - біполярний транзистор з ізольованим затвором, управляється в замкнутій системі з ПІ - регуляторами (струму і швидкості), щоб регулювати двигун;

- навантаження 1, підключено до шин джерела напруги ЕЕС, представлена блоком *3-Phase Series RLC Load*, що моделює трифазну ланцюг, що складається з трьох послідовних *RLC* - навантажень. Схема з'єднання ланцюгів - трикутник. Параметри трифазного навантаження такі: $U=22$ кВ, $P=2000$ кВт, $Q=0$ МВАр, $f=50$ Гц;

- навантаження 2, підключено до шин установки розподіленої генерації, представлена блоком *3-Phase Series RLC Load* з параметрами навантаження $U=0,4$ кВ, $P=75$ кВт, $Q=45$ кВАр, $f=50$ Гц

2.2. Дослідження впливу різних чинників на динаміку системи електропостачання при її паралельній роботі з ЕЕС

У моделі є всі необхідні вимірювальні блоки і пристрої для відображення миттєвих та діючих величин струмів і напруг. Для розгляду динаміки системи електропостачання з розподіленою генерацією при її паралельній роботі з ЕЕС ми досліджуємо такі ситуації:

- пусковий режим асинхронного двигуна в системі;
- аварійний режим в системі електропостачання.

2.2.1. Пусковий режим асинхронного двигуна в СЕС

а) Пряме включення асинхронного двигуна в мережу живлення

Для моделювання процесів пуску двигуна взяті конкретні паспортні дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу 4АН225М4У3,

параметри якого наведені в таблиці 2.2 (розрахунок параметрів двигуна показаний в додатку 1).

Розроблена модель, показана на рис. 2.2 і 2.3, дозволяє отримати необхідну інформацію для аналізу пускового режиму АД при нерегульованому і частотно-регульованому режимах.

Таблиця 2.2. Параметри асинхронного двигуна 4АН225М4У3

Типорозмір двигуна	4АН225М4У3	Одиниці вимірювання
Потужність АД P_H	75	кВт
Напруга $U_{\text{н}}$	400	В
Частота f	50	Гц
ККД, η_H %	92,5	%
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_H$	0,89	о.е.
Активний опір статора R_s	0,06023	Ом
Індуктивність розсіювання статора $L_{s\sigma}$	0,00052	Н
Взаємна індуктивність L_m	0,02384	Н
Активний опір ротора R_r	0,02767	Ом
Індуктивність розсіювання ротора $L_{r\sigma}$	0,00083	Н
Момент інерції J	0,6	кг.м ²
Коефіцієнт тертя F	0	о.е.
Число пар полюсів z_p	2	

Найпростіший і найдешевший спосіб пуску асинхронних двигунів - це прямий пуск. Прямий пуск являє собою приєднання обмоток двигуна безпосередньо до мережі без зміни електричних параметрів мережі. Двигуни живляться від вторинної обмотки трансформатора безпосередньо, без будь-яких перетворювачів (див. рис. 2.1.). В цьому випадку двигуни живляться від

трансформатора 22 / 0,4 кВ, технічні параметри якого описані в таблиці п.3.1 в додатку 3. Результат моделювання показаний на рис. 2.4.

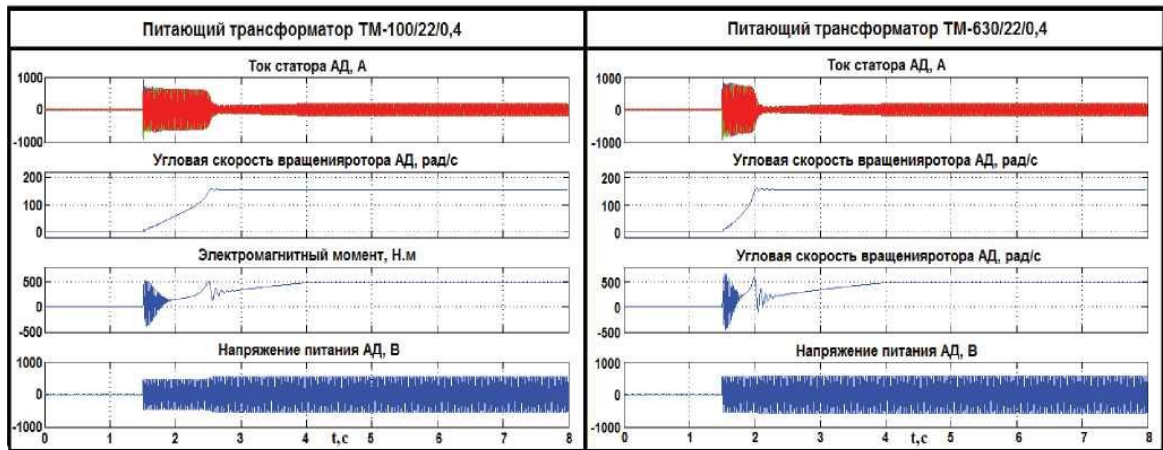


Рис. 2.4. Динамічні характеристики АД при прямому пуску

На графіках залежності струму статора, швидкості і моменту від часу динамічних характеристик нерегульованого АТ видно, що на інтервалі 1,5 - 2,6 с двигун розганяється по природній механічній характеристиці (рис. 2.4). Після цього перехідного процесу двигун, а також система працює в сталому режимі.

Справа в тому, що для пуску двигуна на валу необхідно створити досить великий крутний момент, тому під час пуску двигун розвиває великий пусковий струм, в 5-7 разів більше номінального струму. При невеликій інерційності виконавчого механізму частота обертання двигуна швидко досягає сталого значення і пусковий струм також швидко зменшується, не викликаючи надмірного перегріву обмоток статора. Але такий значний стрибок струму в мережі живлення може викликати помітне падіння напруги, що порушить роботу інших споживачів, включених в цю розподільну мережу. Гранична потужність асинхронного двигуна, що допускає пуск прямим включенням в мережу, визначається в кожному конкретному випадку, в залежності від допустимого навантаження електромережі. Включення такого двигуна в мережу, що живить інші силові і освітлювальні пристрої, не повинно викликати падіння напруги в цій мережі більш ніж на 15% від номінального значення [94].

Тому прямий пуск асинхронного двигуна безпосереднім включенням його в мережу допускається тільки в тому випадку, коли потужність двигуна набагато менше потужності джерела енергії, яке живить мережу.

На практиці при вирішенні питання про пуск електричного двигуна від джерела сумірною потужності користуються таблицею 2.3 [95].

Таблиця 2.3. Співвідношення між потужностями трансформатора та електродвигуна

Джерело живлення	Гранична потужність випускаючого електродвигуна
Трансформатор, що живить силову мережу	20 % потужності трансформатора при частих пусках, 30 % - при рідких
Трансформатор, що живить силову і освітлювальну мережі	4 % потужності трансформатора при частих пусках, 8 % - при рідких
Електростанція малої потужності	12% потужності електростанції
Високовольтна мережа	Не більше 3% потужності трифазного короткого замикання в точці приєднання електродвигуна

Фактично понижуючий трансформатор служить для прийому, перетворення і розподілу електроенергії середньої напруги (6-35 кВ) в низьке (0,4 кВ) і призначений для живлення асинхронного двигуна і місцевого навантаження в системах електропостачання сільських і міських електричних мереж. Потужність трансформатора має безпосередній вплив на процес пуску двигуна і місцевого навантаження. З цією метою виконані дослідження прямого пуску при різних значеннях потужності трансформатора (при відключеній установці розподіленої генерації в системі), який визначає силу зв'язку АТ з системою.

Таблиця 2.4. Результати розрахунку δU_{II} при різних потужностях трансформатора

$S_{тр}, \text{кВА}$		100	160	250	400	630	1000	1600
Для виробничого механізму типу відцентрових насосів	Тривалість провалу напруги $\Delta t_{II}, \text{с}$	1,1	0,8	0,68	0,61	0,58	0,57	0,56
	Глибина провалу напруги $\delta U_{II}, \%$	18,25	12,5	8,25	5,5	3,5	2,25	1,5
Для виробничого механізму типу підйомних кранів	Тривалість провалу напруги $\Delta t_{II}, \text{с}$	0,6	0,53	0,48	0,45	0,44	0,432	0,424
	Глибина провалу напруги $\delta U_{II}, \%$	18,25	12,5	8,25	5,5	3,5	2,25	1,5

δU_{II} глибина провалу (зниження) напруги, характеризується різницею між номінальним значенням напруги і мінімальним діючим значенням напруги, вираженої в одиницях напруги або у відсотках від його номінального значення, і обчислюється за виразами:

$$\delta U_{II} = \frac{U_{НОМ} - U_{МИН}}{U_{НОМ}} 100(\%)$$

Результати в таблиці 2.4 зображені на рис. 2.5 - 2.6 і показують, що чим менше потужність живильного трансформатора, тим більше глибина провалу напруги в вузлі навантаження і тим більше тривалість провалу напруги під час пуску асинхронного двигуна, вони відповідають теорії по експлуатації асинхронного двигуна. При використанні трансформаторної підстанції малої потужності (100 кВА і 160 кВА) затягується час пуску асинхронного двигуна 75 кВт і падіння напруги мережі має достатню велике значення.

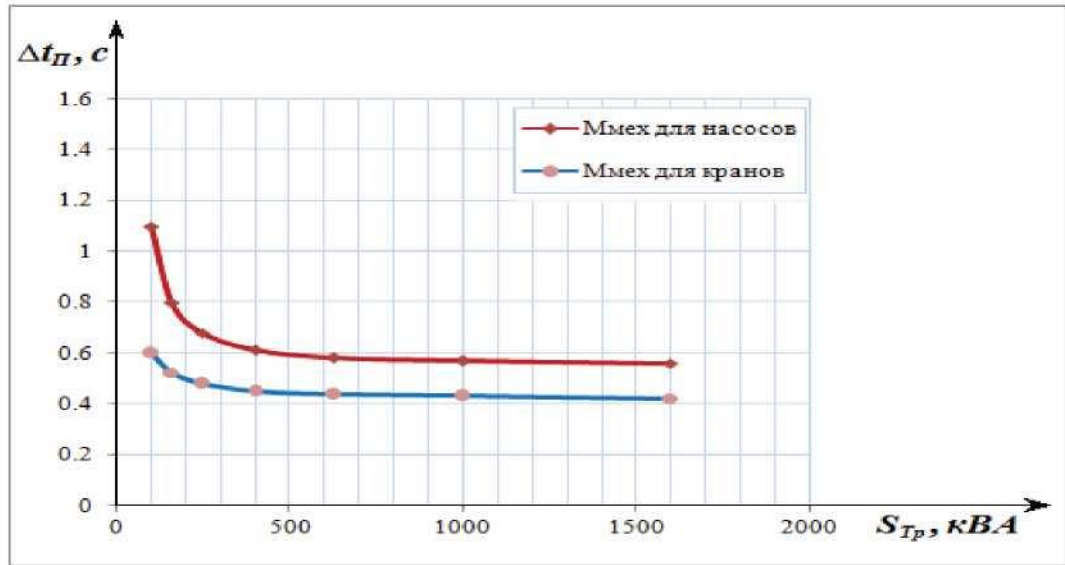


Рис. 2.5. Графік залежності тривалості провалу напруги від потужності трансформатора

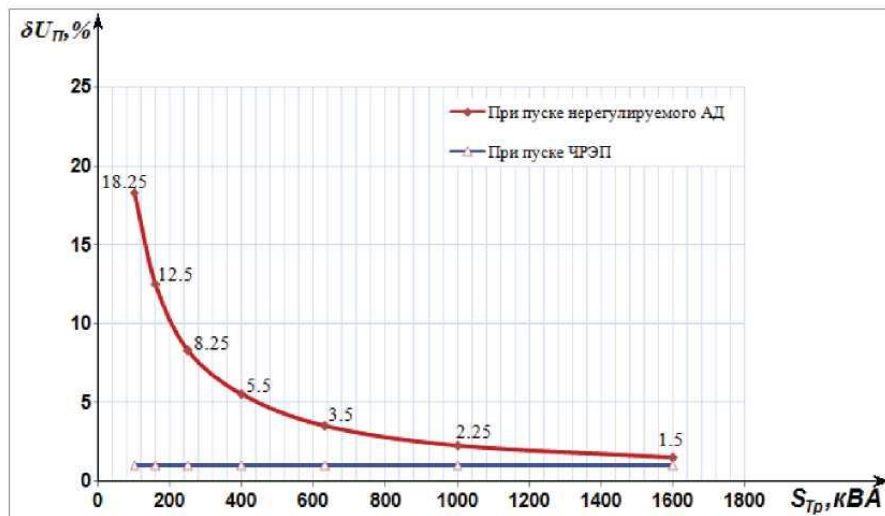


Рис. 2.6. Графік залежності глибини провалу напруги на шинах трансформатора від потужності

При підключенні установки розподіленої генерації в системі електропостачання, як описано на рис. 2.1, падіння напруги на шинах трансформатора і в вузлі навантаження при пуску асинхронного двигуна зменшується (див. рис. 2.7 і 2.8).

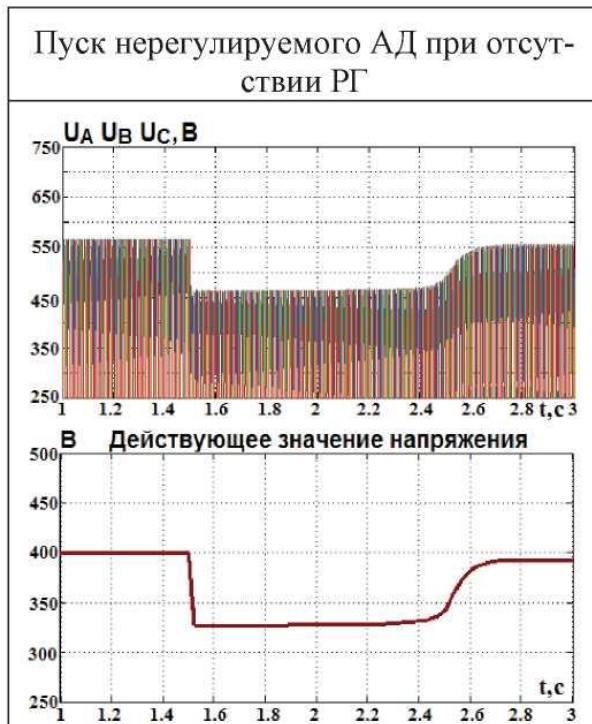


Рис. 2.7. Напряга на шинах трансформатора при пуску АД без РГ

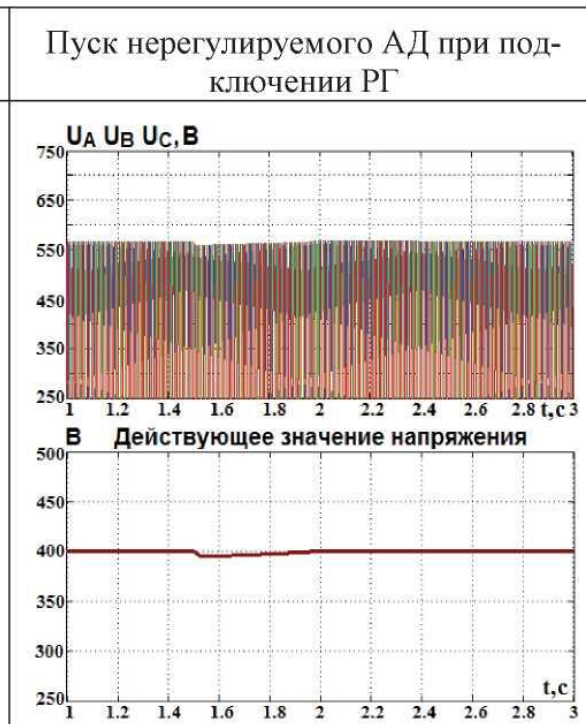


Рис. 2.8. Напряга на шинах трансформатора при пуску АД з РГ



Рис. 2.9. Діюче значення напруги на ЛЕП АС-70

На рис. 2.9 показана осцилограма діючого значення напруги на лінії електропередачі в усіх випадках (пуск асинхронного двигуна з різними типами виробничого механізму, пуск при використанні частотно-регульованого електроприводу).

Результати моделювання показали, що якісний прямий пуск (за ГОСТом 32144-2013 [98] зниження напруги в вузлі навантаження від номінального значення не повинно перевищувати 10%) асинхронного двигуна можливий за умови, якщо потужність трансформатора перевищує потужність двигуна приблизно більше, ніж в 4 рази. Крім того, провал напруги на шинах трансформатора при пуску асинхронного двигуна ще залежить від типу виробничого механізму (глибина провалу напруги однакова, але тривалість провалу напруги різна через різне процесу розгону двигуна). Напруга на лінії електропередачі майже не знижується в процесі пуску асинхронного двигуна.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступний висновок: за рахунок підключення розподіленої генерації відбувається помітне зниження глибини провалу напруги на шинах трансформатора і в вузлі навантаження при пуску асинхронного двигуна.

б) Застосування частотно-регульованого електроприводу при пуску АД

Відомо, що прямий пуск несе в собі обмеження, які не дозволяють його застосовувати в деяких додатках [99]:

- Стрибок струму при старті може вносити перешкоди в роботу інших приладів, підключених до тієї ж лінії живлення;
- Механічне ударне навантаження в процесі старту може виявитися неприпустимою для пристрою або може зробити шкідливий вплив на комфорт і безпеку користувача;
- Неможливо управляти розгоном і гальмуванням;
- Неможливо регулювати швидкість.

Для обмеження струму і плавного пуску застосовуються реостатний і автотрансформаторним пуск, а також сучасні електронні пристрої – soft-статери (пристрої плавного пуску). Але в рамках роботи досліджений тільки «частотний спосіб» (застосування частотно-регульованого електроприводу), який здатний вирішити проблеми, не тільки пуску АД, а й його поведінки в аварійних режимах.

На основі побудованої моделі, показаної на рис. 2.3, виконано дослідження пуску асинхронного двигуна за допомогою частотного перетворювача.

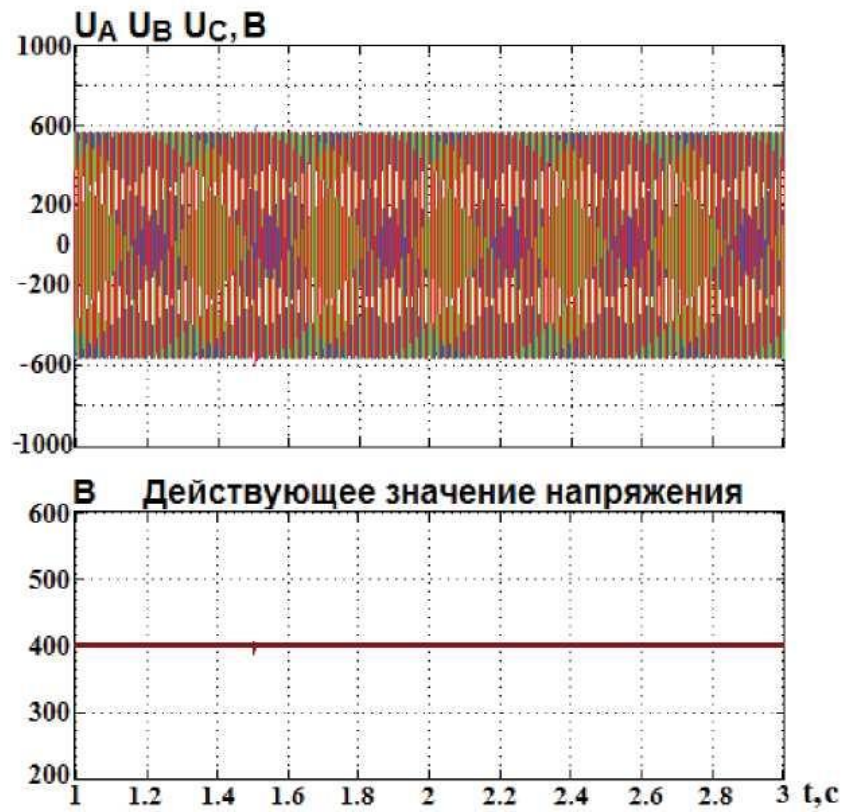


Рис. 2.10. Напруги на шинах трансформатора при пуску ЧРЕП

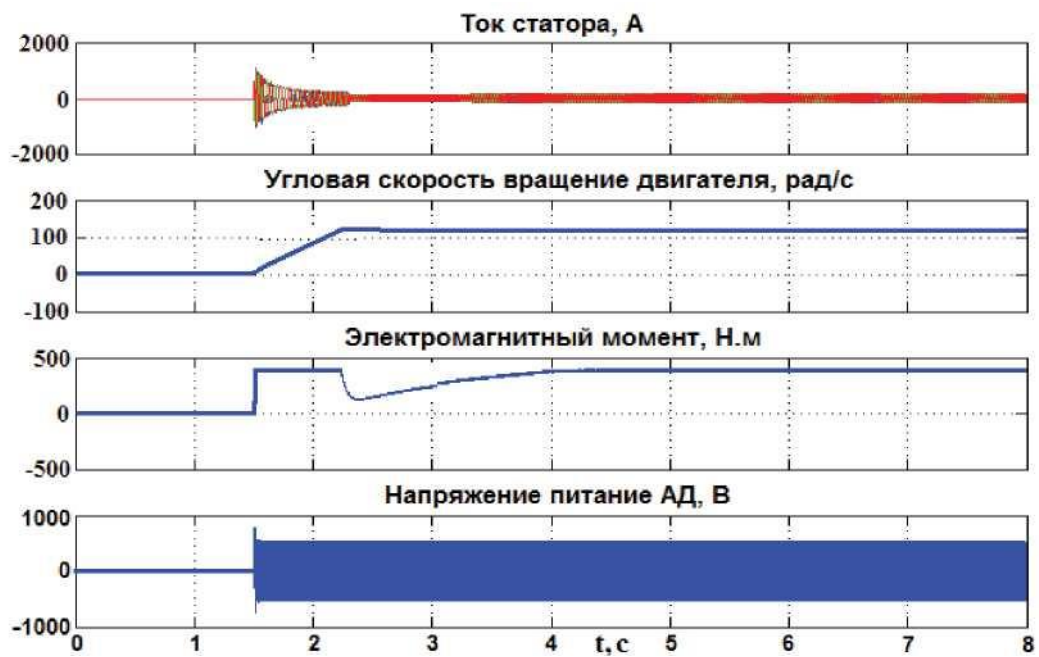


Рис. 2.11. Динамічні характеристики АД при застосуванні ЧРЕП

На рис. 2.11 показані результати моделювання динамічних характеристик АД при пуску з ЧРЕП. При різних значеннях потужності трансформатора отриманий одні і той же результат моделювання. На графіку видно, що хоча час пуску АД більше, ніж випадок прямого пуску, але використання ЧРЕП дає плавний пуск і може здійснюватися в малопотужної мережі. Завдяки ЧРЕП знижується ймовірність перегріву обмоток, пуск проходить плавно (без небезпечних гідравлічних ударів у випадку з насосами).

Несинусоїдальність напруги при застосуванні частотно - регульованого асинхронного електроприводу

Як відомо частотні перетворювачі для регулювання асинхронних електроприводів є потужними джерелами гармонійних спотворень. Згідно ГОСТ 32144-2013 [98] несинусоїдальність напруги характеризується коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги і коефіцієнтом п-ої гармонійної складової напруги.

Сумарний коефіцієнт гармонійних складових напруги K_U визначається наступним вираженням:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\%$$

де $U_{(n)}$ - діюче значення і-ої гармонійної складової напруги;

n - порядок гармонійної складової напруги;

N - порядок останньої з врахованих гармонійних складових напруги (стандартом встановлюється);

$U_{(1)}$ - діюче значення напруги основної частоти.

На рис. 2.12 і 2.14 представлені осцилограми лінійних напруг на шинах трансформатора при відключенні і включенні розподіленої генерації в системі електропостачання. На рис. 2.13 і 2.15 приведені діаграми, що ілюструють спектральний склад напруги на шинах трансформатора при відключенні і включенні розподіленої генерації в системі електропостачання.

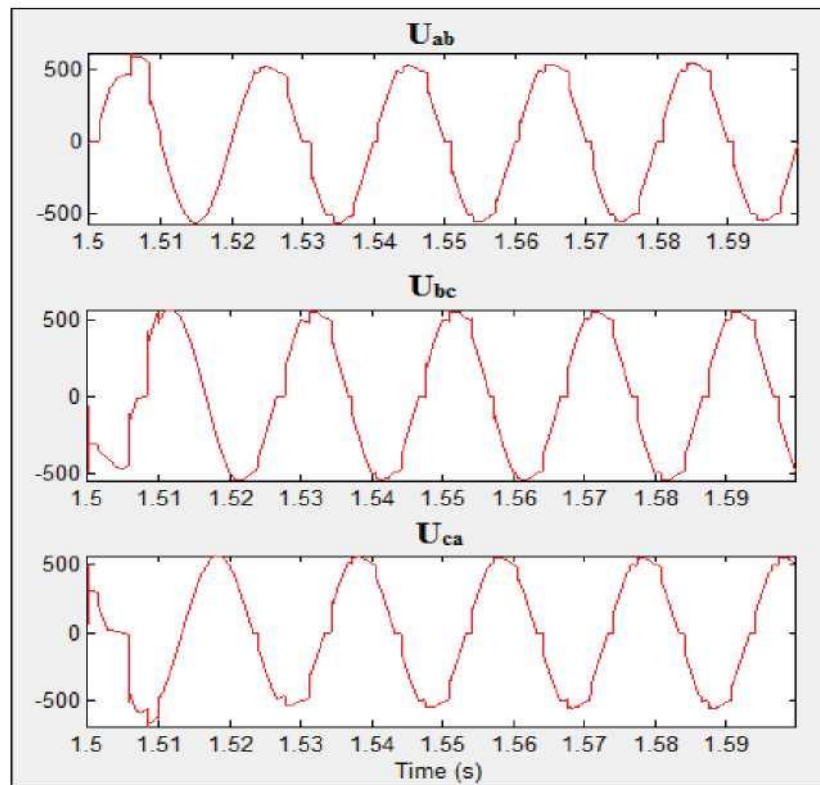


Рис. 2.12. Осцилограма напруги на шинах трансформатора після включення частотно-регульованого електроприводу в СЕС без РГ

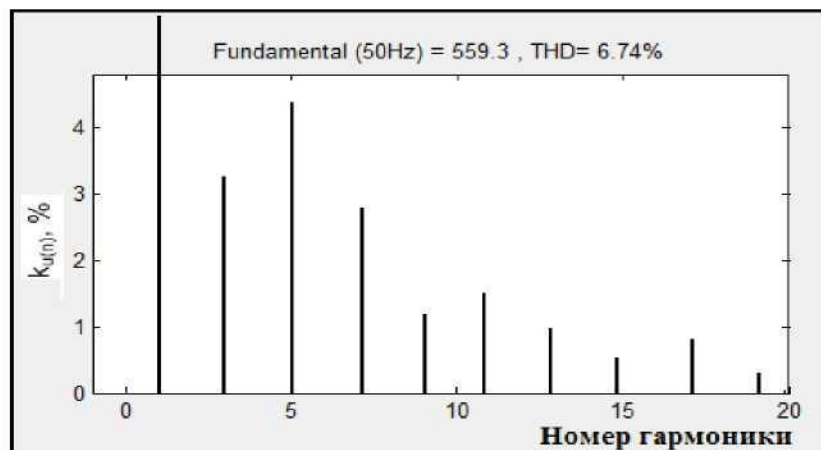


Рис. 2.13. Спектральний склад напруги U_{ab} на шинах трансформатора при відсутності РГ в СЕС в режимі розгону двигуна

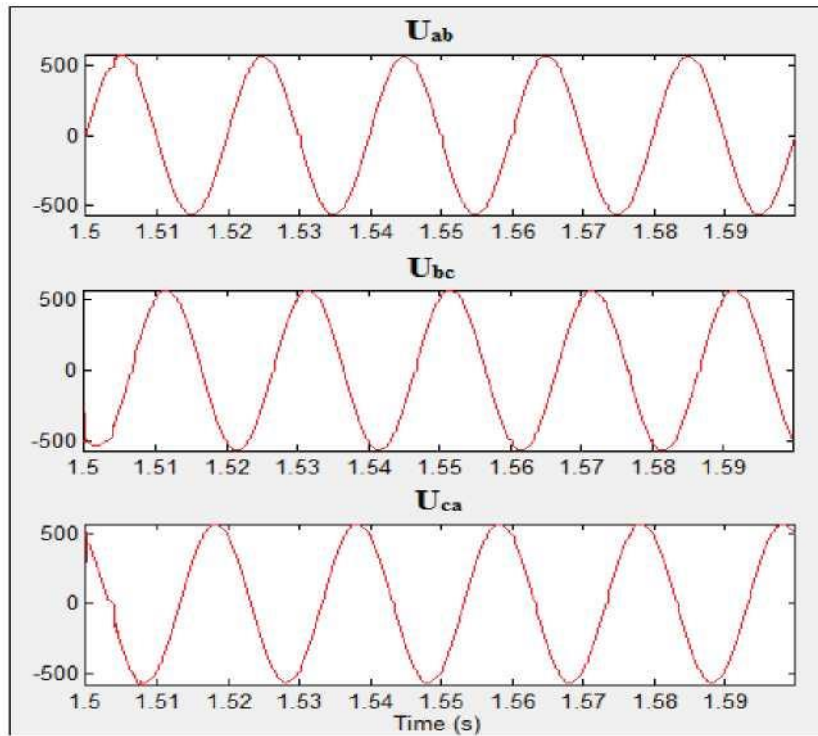


Рис. 2.14. Осцилограма напруги на шинах трансформатора після включення частотно-регульованого електроприводу в СЕС з РГ

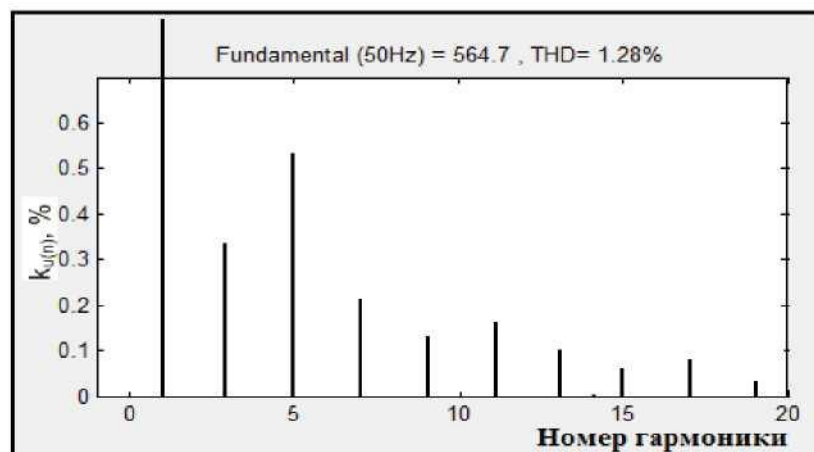


Рис. 2.15. Спектральний склад напруги U_{ab} на шинах трансформатора при підключенні РГ в СЕС

Результати моделювання, що характеризують якість електроенергії (значення сумарних коефіцієнтів гармонійних складових напруги K_i) на шинах трансформатора 22 / 0,4 кВ, наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Значення сумарних коефіцієнтів гармонійних складових напруги K_i на шинах трансформатора

Модель	Режим РГ	$K_U, \%$		
		U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
СЕП з частотно-регульованим електроприводом	РГ відключена	4,818	4,789	4,937
	РГ включена	0,9349	0,8708	0,8442

Інтенсивність гармонійних спотворень напруги живлення при роботі в електромережі нелінійного навантаження залежить від співвідношення потужності живильного джерела і сумарної потужності нелінійних споживачів. Чим могутніша мережа по відношенню до всіх нелінійних споживачів, тим менше рівень гармонійних спотворень [96, 97]. При цьому розподілена генерація як потужне джерело живлення забезпечить синусоїди напруги в мережі, так як підключення РГ до мережі, має нелінійний споживач, дозволяє знижувати коефіцієнт спотворення синусоїдальності K_U .

За ГОСТ 32144-2013 [98] значення сумарних коефіцієнтів гармонійних складових напруги мережі 0,38 кВ має нормально допустимі значення 8,0% (гранично допустиме значення до 12%). Насправді існують багато варіантів, щоб забезпечити високу ефективність для зменшення гармонік спотворення. Детальний розгляд застосовуваних засобів виходять за рамки теми дисертації.

Отримані результати показують, що застосування установок розподіленої генерації в системі електропостачання з частотно - регульованим асинхронним електроприводом дозволяє зменшити коефіцієнт спотворення синусоїдальності

кривої напруги, і також зменшити відхилення напруги і глибини провалу напруги при пуску АД. Слід зазначити, що більше покращення показників якості електроенергії відбувається в точках мережі, розташованих ближче до джерела РГ.

2.2.2. Аварійний режим в системі електропостачання з розподіленою генерацією та асинхронним двигуном

Питання розрахунку перехідних процесів в розподільних електричних мережах напругою 22 кВ при виникненні коротких замикань і способи забезпечення їх більш надійної роботи є актуальними з наукової та практичної точок зору. До останнього часу ці підходи розглядали в якості об'єкта пасивну розподільну електричну мережу, що не містить джерел генерації, крім основного пункту живлення від електроенергетичної системи (ЕЕС). Поширення джерел розподіленої генерації в СЕП вимагає розгляду і дослідження перехідних процесів за допомогою моделювання на ЕОМ, яке застосовується і в даній роботі.

В якості тестової схеми взята система електропостачання, що включає основний пункт живлення, дизель-генераторну установку, що представляє розподілену генерацію, трансформатор, нерегульований асинхронний двигун і асинхронний двигун з частотним перетворювачем описані на рис. 2.1 - 2.3.

А) Перший сценарій: Момент опору приводного механізму не залежить від швидкості ($M_C = const$)

Моделюваний сценарій процесів в СЕС виглядає наступним чином:

- У початковий момент запускаємо модель системи ЕЕС з РГ.
- У момент часу $t=0,25\text{с}$ відбувається трифазне коротке замикання на перемичці між шинами системи і вимикачем.
- У момент часу $t=0,5\text{ с}$ відбувається відключення аварійної лінії від системи.

А1. Система електропостачання з асинхронним електроприводом без частотного перетворювача

На рис. 2.16 - 2.17 показані графіки залежності напруги і струму від часу, вимірювані на шинах 22 кВ СЕП. З графіків видно, що під час короткого замикання ударний струм має максимальне амплітудне значення 376А. На графіку напруги, що живить асинхронний двигун від вторинної обмотки трансформатора, видно вплив короткого замикання в мережі на роботу трансформатора і також на роботу асинхронного двигуна.

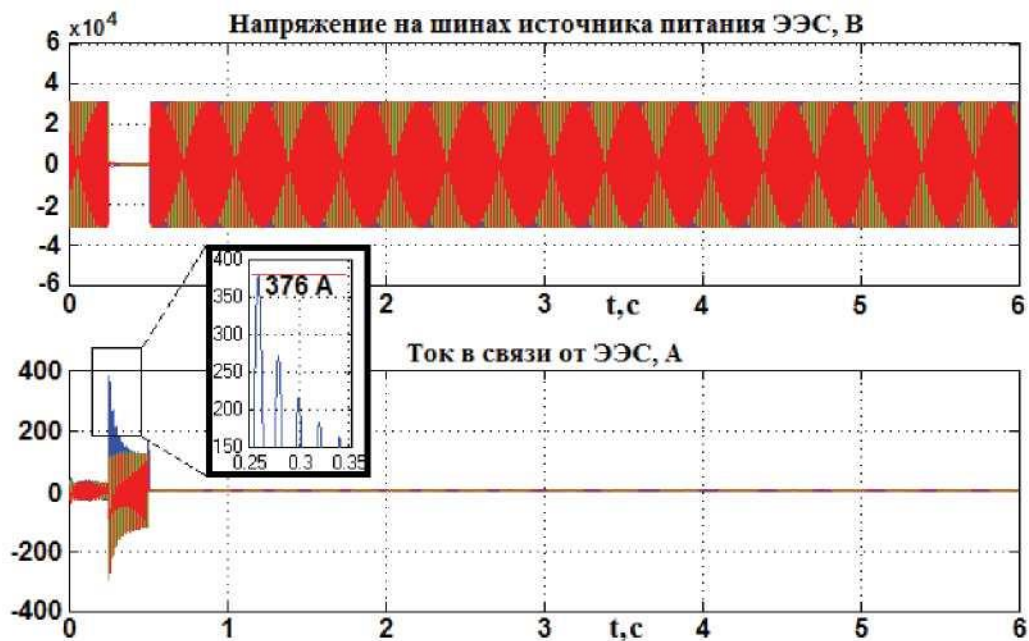


Рис. 2.16. Графік напруги і струму на перемичці між шинами СЕС і вимикачем



Рис. 2.17. Діюче значення напруги живлення нерегульованого АД

На рис. 2.18 видно, що дизельна електростанція здатна змінювати споживану потужність для завантаження системи, а також адаптуватися до аварії в СЕС.



Рис. 2.18. Активна і реактивна потужність ДЭС

Графіки залежності динамічних характеристик АД (струму статора, кутової швидкості та електромагнітного моменту) від часу показані на рис. 2.19. У цьому випадку потужність трансформатора дорівнює 250 кВА і в звичайному режимі час пуску АД потрібно 0,62 с, але при короткому замиканні час пуску затягується до 1,6 с.

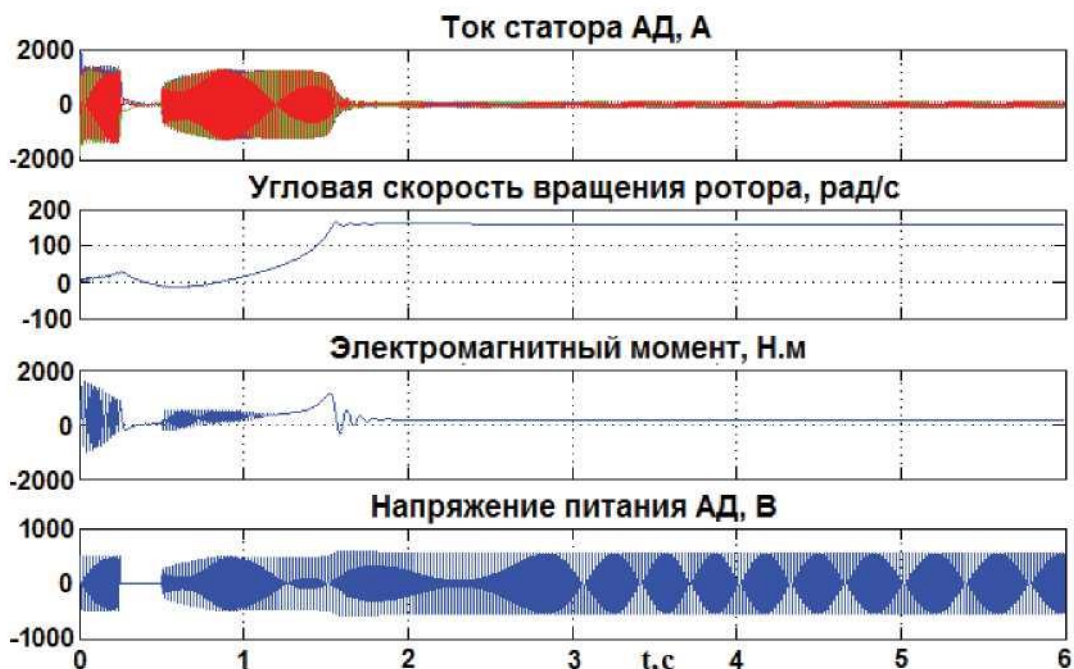


Рис. 2.19. Динамічні характеристики нерегульованого АД

Далі показані динамічні характеристики синхронного генератора ДЕС. З перехідного процесу видно, що ДЕС відпрацьовує сигнал завдання за швидкістю і вихідною напругою СГ. Сталі значення досягаються приблизно через 2 секунди (рис. 2.20).

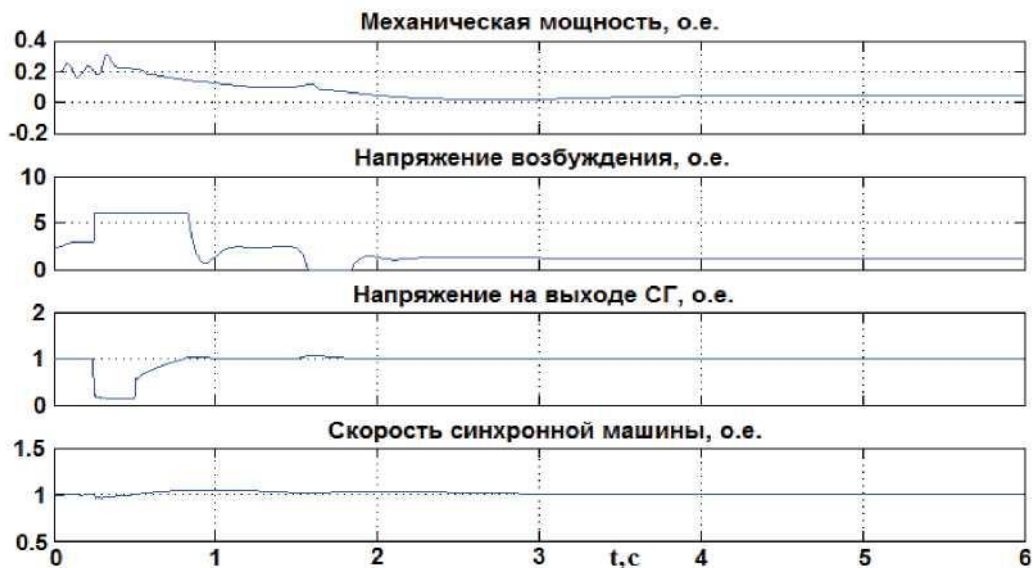


Рис. 2.20. Динамічні характеристики СГ

2.2.3 Система електропостачання з асинхронним електроприводом з частотним перетворювачем

Досліджувана модель в цьому випадку показана на рис. 2.3. Результати моделювання на рис. 2.21 і 2.22 показують графіки напруги і струму в лінії, що зв'язує шини 22 кВ і ЕЕС. Діюче вихідне значення напруги трансформатора, яке живить АД. При використанні ЧРЕП для управління АД під час короткого замикання ударний струм отримав максимальне амплітудне значення 360 А (менше ніж випадок використання нерегульованого АД). На рис. 2.22 показано, що при використанні ЧРЕП напруга на вторинній обмотці трансформатора менше знижується і швидше стабілізується, і падіння напруги при завантаженні АД теж невелике.

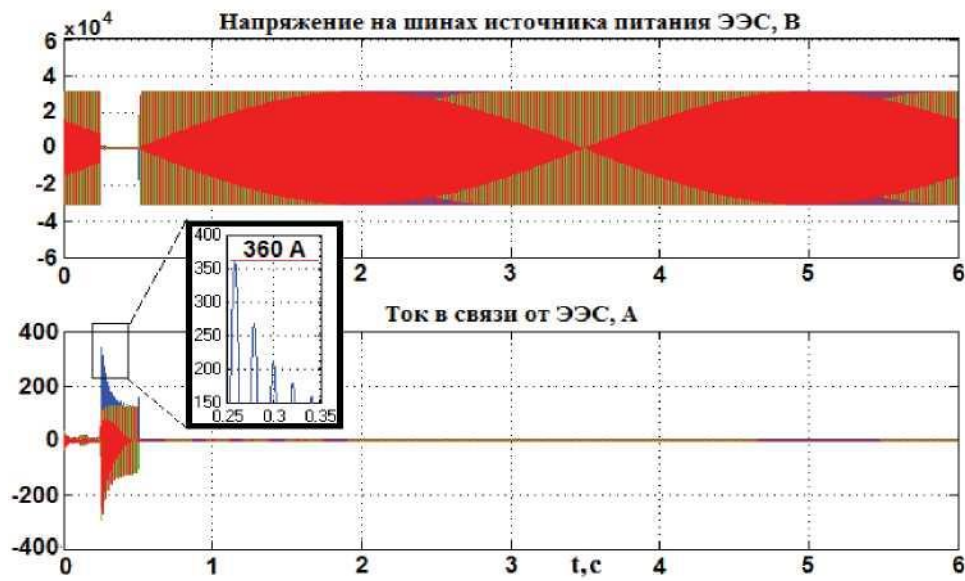


Рис. 2.21. Графік напруги і струму на перемичці між шинами СЕП і вимикачем

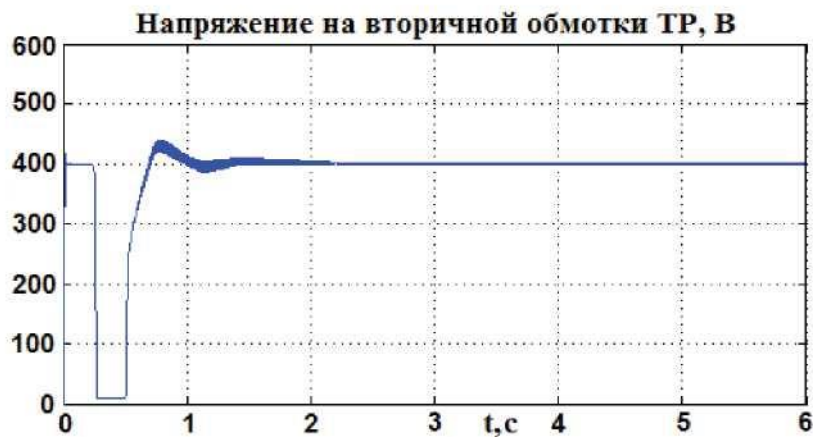


Рис. 2.22. Діюче значення напруги живлення АД

З графіка потужностей ДЕС видно, що в ситуації використання ЧРЕП споживана реактивна потужність для завантаження системи при короткому замиканні менше (рис. 2.23).



Рис. 2.23. Активна і реактивна потужність ДЕС

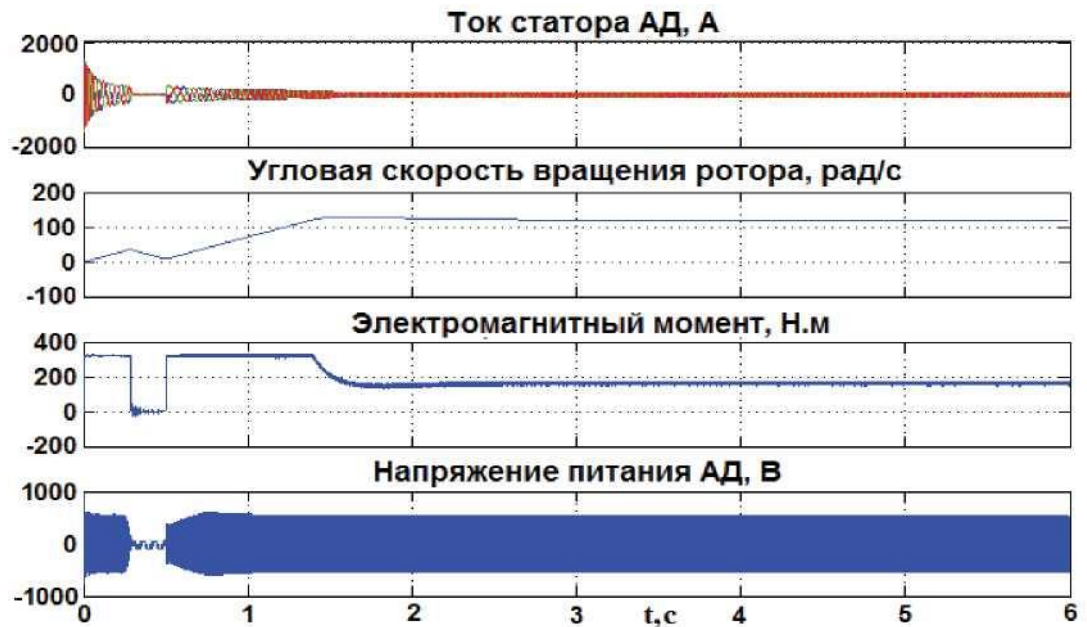


Рис. 2.24. Динамічні характеристики АД

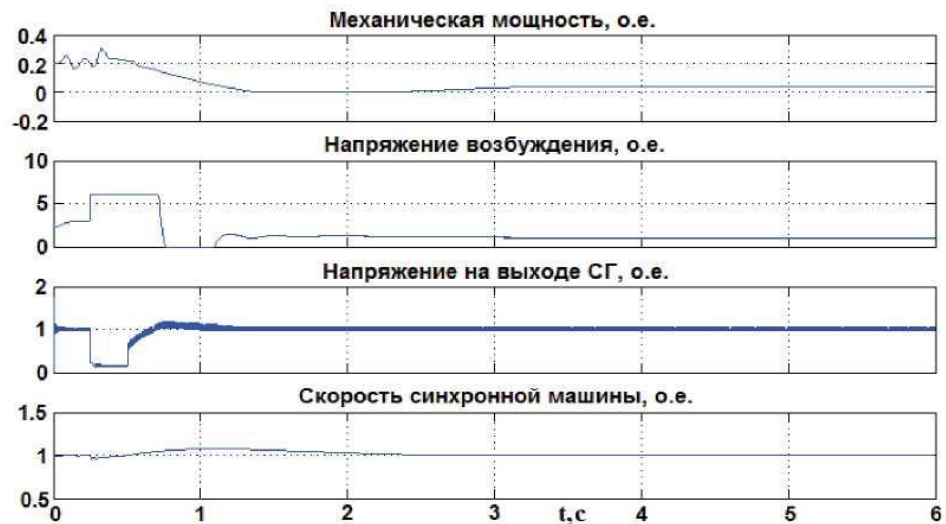


Рис. 2.25. Динамічні характеристики СГ

У момент часу 0,25 с відбувається коротке замикання на шинах 22 кВ, яке відключається в момент часу 0,5 с від системи "дизель-генератор - асинхронний двигун" розмиканням вимикача. Перехідні процеси в асинхронному двигуні та синхронному генераторі показані відповідно на рис. 2.24 і 2.25. Слід звернути увагу на те, що частотне регулювання підтримує напругу і обмежує пусковий струм в обмотці статора. Тому в цьому випадку час для завантаження АД менше в порівнянні з випадком використання АД без частотного перетворювача (1,4 с). Далі процеси в синхронній машині і частотно-регульованому асинхронному двигуні стабілізуються, а кутова швидкість обертання ротора асинхронного двигуна під дією частотного регулювання як і раніше підтримується незмінною.

Б) Другий сценарій: Момент опору приводного механізму для насосів

Модельований сценарій процесів в СЕС виглядає наступним чином:

- У початковий момент запускається модель системи з РГ.
- У момент часу $t=1,5$ с запускається асинхронний двигун.
- У момент часу $t=4,75$ с відбувається трифазне коротке замикання на перемичці між шинами системи і вимикачем.
- У момент часу $t=5,0$ с відбувається відключення аварійної лінії від ЕЕС

Б.1 Система електропостачання з асинхронним електроприводом без частотного перетворювача

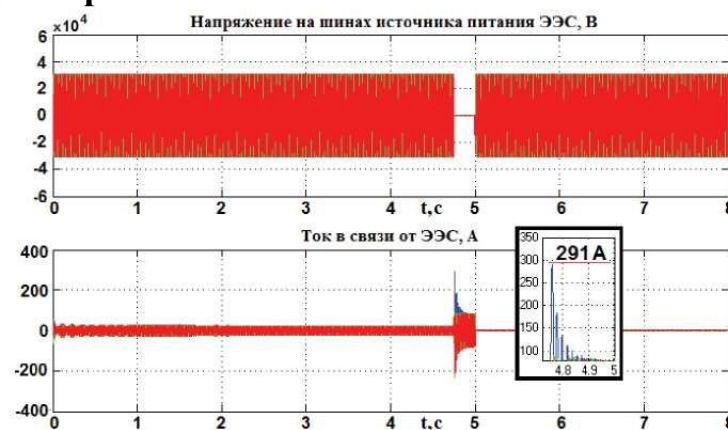


Рис. 2.26. Графік напруги і струму на перемичці між шинами СЕС і вимикачем

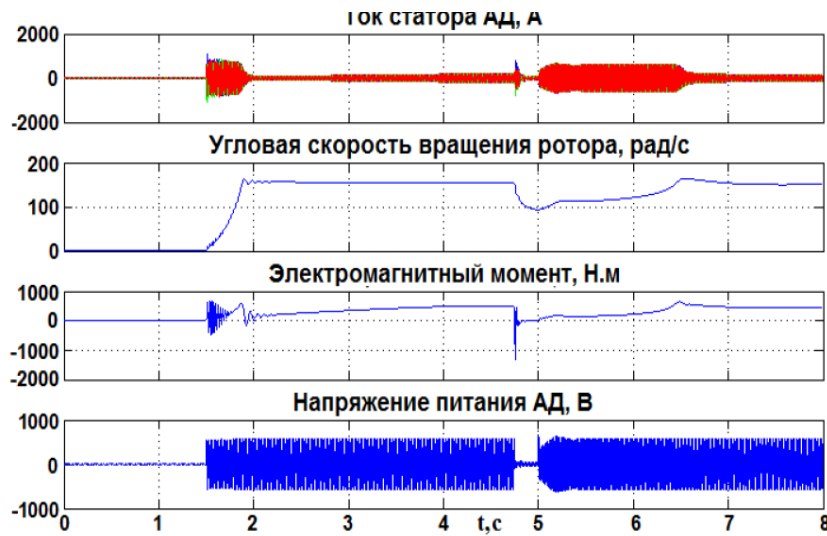


Рис. 2.27. Динамічні характеристики нерегульованого АД

Б.2 Система електропостачання з асинхронним електродвигуном з частотним перетворювачем

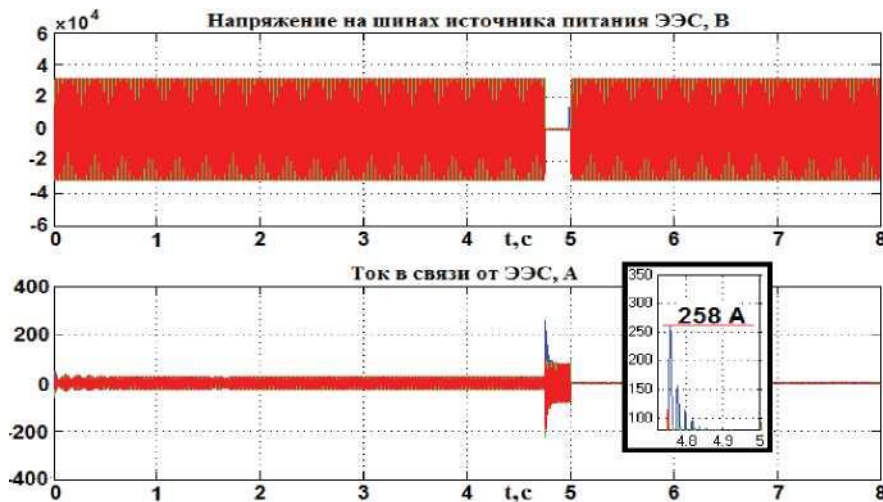


Рис. 2.28. Графік напруги і струму на перемичці між шинами СЕС і вимикачем

На основі результатів моделювання можна зробити висновки про те, що використання частотно-регульованого електроприводу в системі з насосом дозволяє зменшити значення ударного струму при короткому замиканні в системі електропостачання.

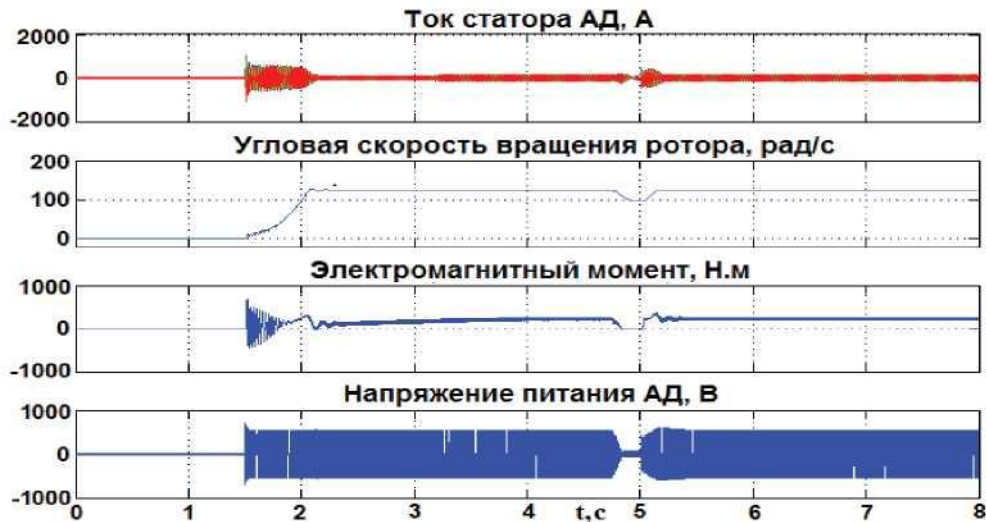


Рис. 2.29. Динамічні характеристики АД при застосуванні ЧРЕП

Частотно-регульований електропривод для насоса забезпечує швидке відновлення і стабілізацію після відключення системи від аварійної лінії.

Можливість регулювання ЧРЕП для виробничого механізму типу підйомних кранів показана на рис. 2.30. Такий тип виробничих механізмів характеризується механічною характеристикою, що не залежить від швидкості обертання ротора двигуна. Таким чином, споживана потужність двигуна змінюється пропорційно швидкості обертання. При застосуванні ЧРЕП для такого типу механізму використовують векторний спосіб управління, щоб отримати точне регулювання і широкий діапазон регулювання.

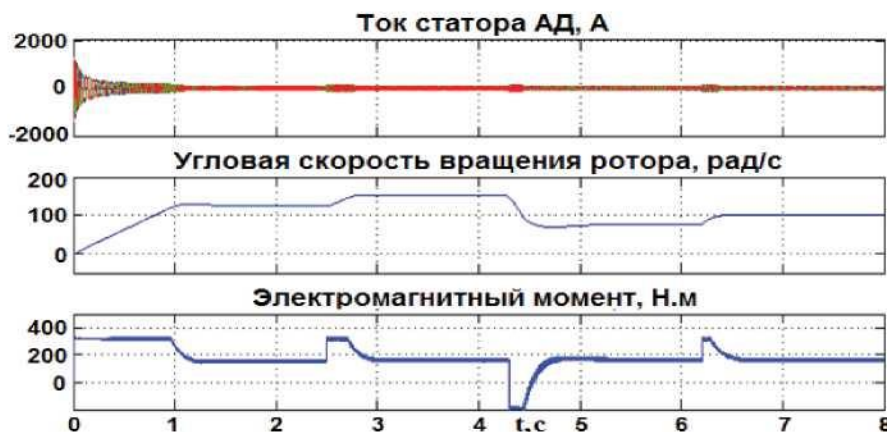


Рис. 2.30. Регулювання швидкості АД при постійному моменті навантаження

Для відцентрового насоса споживана потужність змінюється пропорційно кубу швидкості обертання. Тому впровадження частотно - регульованих електроприводів на насосних станціях в житлово-комунальному господарстві знижує електроспоживання в середньому на 50-60%, зменшує витрату води на 25%, усуває гідроудари. Скалярний управління АД є гарною альтернативою для застосувань, де немає змінного навантаження і не потрібна гарна динаміка, як для насоса і вентилятора. Результати моделювання динамічних характеристик асинхронного двигуна і насоса при регулюванні швидкості показані на рис. 2.31 і 2.32

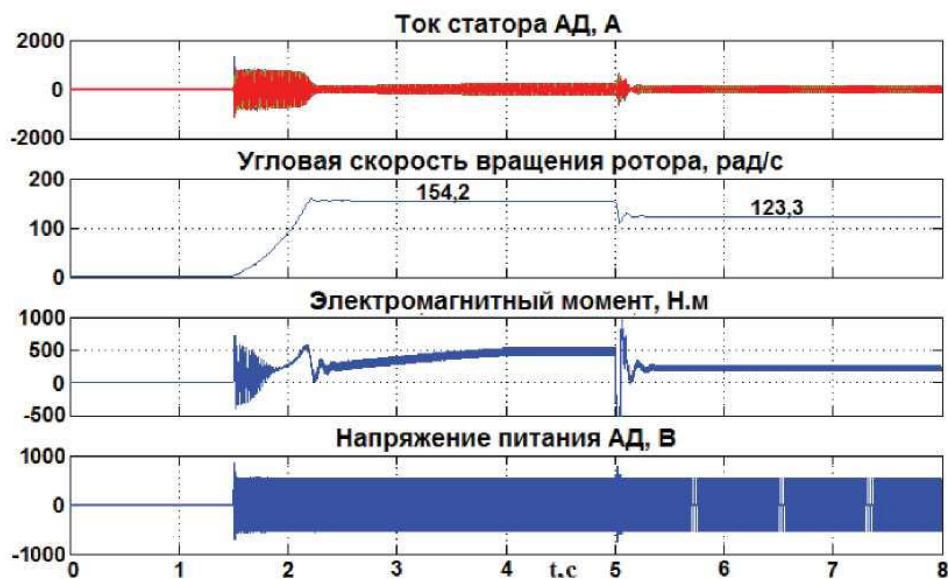


Рис. 2.31. Регулювання швидкості АД для механізму типу насосів

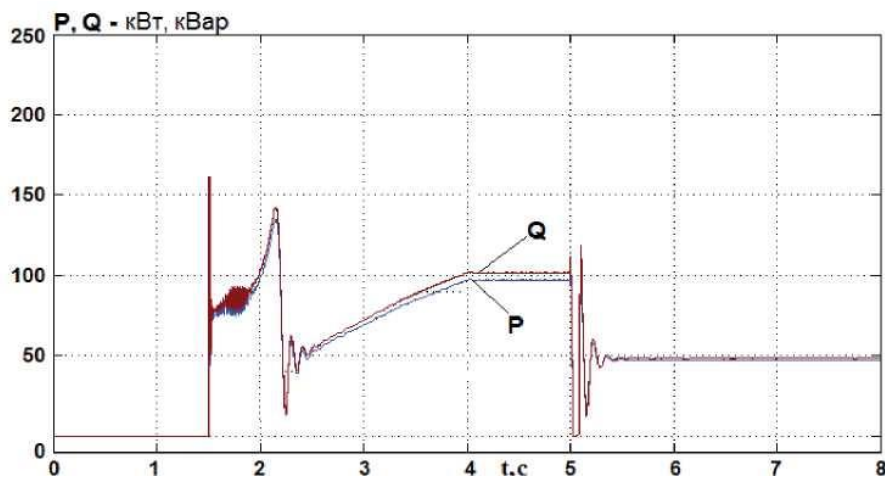


Рис. 2.32. Споживана активна і реактивна потужності АД при регулюванні швидкості для механізму типу насосів

При масовому використанні ЧРЕП в системах електропостачання специфіка взаємодії такого асинхронного навантаження з системою, особливо з установками розподіленої генерації, які набувають все більшого поширення в системах електропостачання, залишається поки невивченою і вимагає спеціальних досліджень.

Вже згадана ситуація характерна для систем електропостачання сільськогосподарських районів півдня України, а також гірських районів при наявності великої кількості асинхронних двигунів, які використовуються в якості електроприводу насосів в системі зрошення. Як правило, такі системи електропостачання мають один або більше пунктів живлення від основної мережі ЕЕС України, а в якості місцевих установок розподіленої генерації використовуються дизель-генераторні електростанції. Таким чином, дана проблема має не тільки теоретичний сенс, але і велике практичне значення, і досліджена в розділі 3.

Висновки до розділу 2

1. Для дослідження динамічних процесів в системі електропостачання з розподіленою генерацією побудована математична модель СЕП, що включає дизельну електростанцію в якості установки РГ і частотно-регульований електропривод.

2. В результаті дослідження на імітаційній моделі асинхронного електроприводу з ЧРЕП було визначено, що з застосуванням частотного перетворювача підвищується не тільки точність регулювання, а й покращуються пускові режими асинхронного двигуна, а саме, зменшуються пускові струми і пусковий момент. Крім того використання ЧРЕП допомагає стабілізувати напругу в точці підключення споживача і дозволяє розвантажити АД великої і середньої потужності в малопотужній системі.

3. Застосування установок розподіленої генерації в системі електропостачання з частотно - регульованим асинхронним електроприводом дозволяє зменшити значення сумарних коефіцієнтів гармонійних складових напруги, а також зменшити відхилення напруги і глибину провалу напруги при пуску АД.

4. Установка розподіленої генерації дає можливість відновлення роботи системи при аварійних ситуаціях. Модель розподіленої генерації дозволяє працювати з різними значеннями генерованої активної потужності і створювати сприятливі умови для проведення досліджень в подальшому.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ РГ І МАСОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ЧРЕП В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ

3.1. Характеристики схеми електропостачання

Схема розподільної мережі для сільськогосподарських і передгірних районах, спроектована і побудована для забезпечення електроживлення навантажень малої потужності. Схема системи електропостачання має одне головне джерело живлення від енергосистеми через шини підстанції 22 кВ, і джерело розподіленої генерації (дизельна електростанція) малої потужності, яке підключений в вузлі 18 (рис. 3.1). Схема представлена 18 вузлами, 17 зв'язками, навантаження живляться через трансформатори 22 / 0,4 кВ невеликої потужності для забезпечення електроживлення гірничовидобувних підприємств, об'єктів промисловості, виробництв переробки, зрошувальної системи, тваринництва, млинів рису, молотарок рису, ремонту обладнання ферм, медичних установ, шкіл і сільськогосподарських господарств. Розподільні лінії є повітряними лініями з проводами марок: АС120,95, 70, 50. Розподільні лінії в основному одно ланцюгові і мають велику довжину (через розосередження навантаження і джерел живлення). Тому споживачі мають дуже низьку надійність електропостачання. Параметри схеми наведені в таблицях 3.4 і 3.5. Схема мережі представлена на рис 3.1.

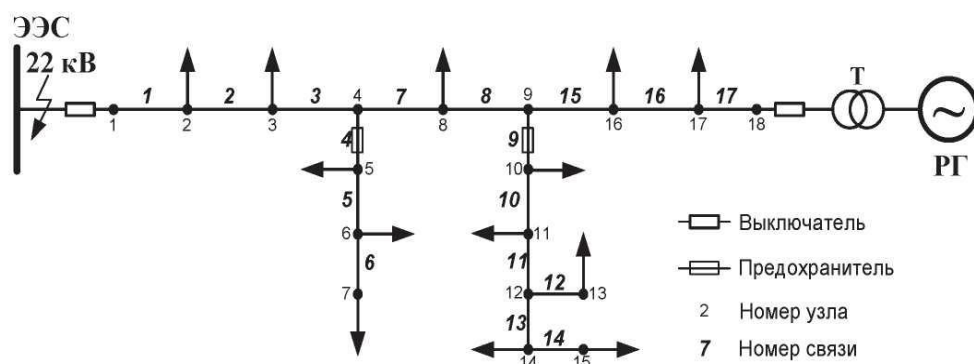


Рис 3.1. Схема електропостачання з РГ

Таблиця 3.1. Потужності генерації і навантаження

Номер вузла	S_G , МВА	$P_{НАВ}$ МВт	$Q_{НАВ'}$ МВАр	Найменування галузі і підприємства
1	0	0	0	
2	0	0,085	0,053	Підприємство харчової промисловості
3	0	0,085	0,053	Насосна станція
4	0	0	0	
5	0	0,042	0,026	Фермерське господарство
6	0	0,042	0,026	Фермерське господарство
7	0	0,042	0,026	Торговий центр
8	0	0,05	0,031	Адміністративна будівля
9	0	0	0	
10	0	0,042	0,026	Фермерське господарство
11	0	0,042	0,026	Фермерське господарство
12	0	0	0	
13	0	0,042	0,026	Фермерське господарство
14	0	0,042	0,026	Фермерське господарство
15	0	0,042	0,026	Фермерське господарство
16	0	0,085	0,053	Завод сільськогосподарського машинобудування
17	0	0,085	0,053	Завод овочевих і фруктових консервів
18	0,91	0	0	Дизельний генератор

Таблиця 3.2. Параметри ліній електропередач на схемі.

№ зв'язку	Номера вузлів		Марка провод	Довжина лінії, м
	початковий	кінцевий		
1	1	2	АС70	800
2	2	3	АС70	400
3	3	4	АС70	1435
4	4	5	АС70	2688
5	5	6	АС70	1300
6	6	7	АС70	1216
7	4	8	АС70	1320
8	8	9	АС70	40
9	9	10	АС70	2688
10	10	11	АС70	1411
11	11	12	АС70	1801
12	12	13	АС70	79
13	12	14	АС50	3069
14	14	15	АС70	1000
15	9	16	АС70	1342
16	16	17	АС95	101,5
17	17	18	АС120	2100

3.2. Розробка математичної моделі для досліджень аварійних режимів в системі електропостачання сільськогосподарського району

На рис. 3.1 показана електрична схема системи електропостачання району. Для оцінки перехідних процесів, що відбуваються в мережі в різних ситуаціях, необхідно створити математичні моделі дизель-генераторної установки, ліній електропередачі і трансформатора. Для створення моделі роботи мережі використовувався пакет прикладних програм моделювання динамічних систем Simulink пакета MATLAB. На рис. 3.2 представлений загальний вид

комп'ютерної моделі системи електропостачання, яка містить всі описані параметри в пункті 3.1.3.

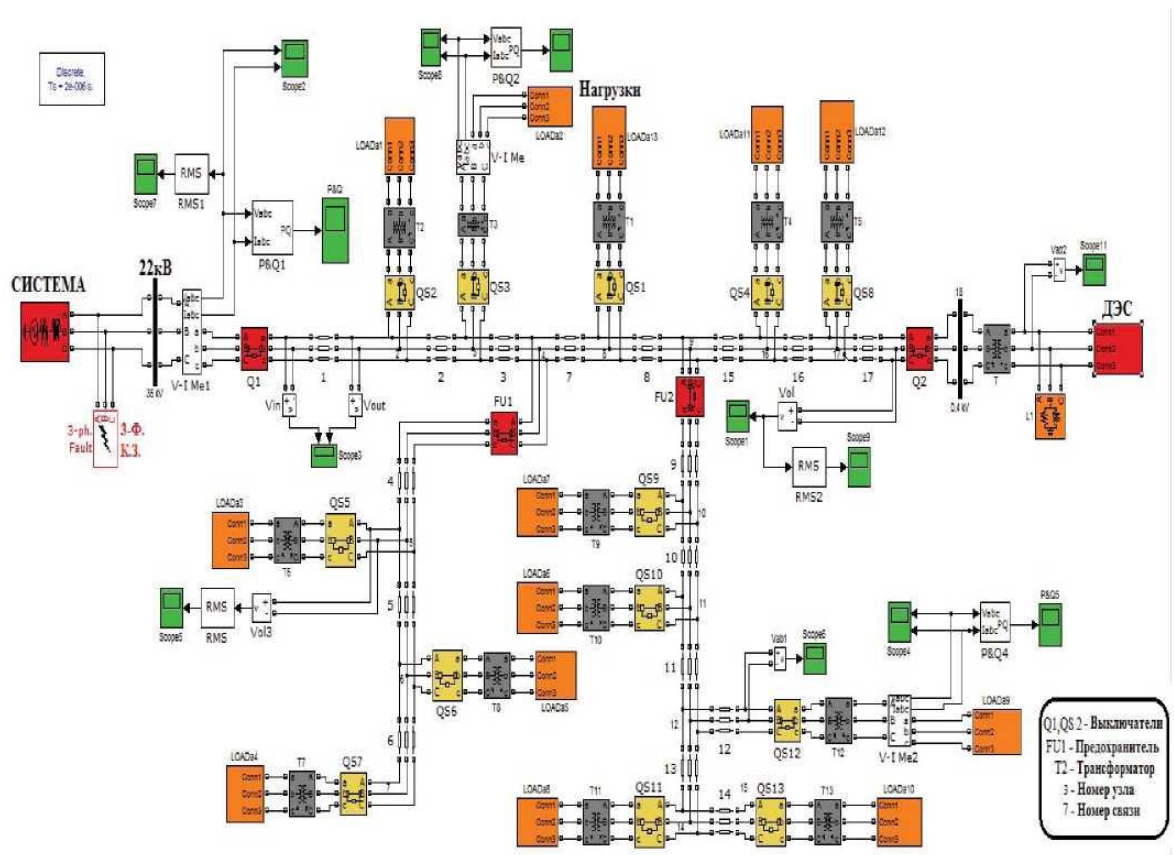


Рис. 3.2. MATLAB - модель розподільної мережі сільськогосподарського району

Розроблена комп'ютерна модель електричної мережі напругою 22 кВ надає широкі можливості для досліджень. Вона дозволяє моделювати такі режими електричної мережі, які складно організувати в реальній мережі. Такими режимами можуть бути обрив нульового проводу, однофазне коротке замикання, трифазне коротке замикання в різних вузлах мережі і т.д.

Результати, отримані на комп'ютерній моделі, залежать від того, наскільки коректно зібрана модель і задані параметри елементів.

Таблиця 3.3. Результати розрахунків ударних струмів в лінії зв'язку 1 при к.з. в різних вузлах схеми електропостачання району (СЕР)

КЗ у вузлі №	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ік.з. , А в лінії 1	210	525	520	513.5	495	486.5	479	508	504
КЗ у вузлу №	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ік.з. , А в лінії 1	486	476.5	466	445	437	498	494	488	329



Рис. 3.3. Значення струмів в лінії 1 при КЗ в різних вузлах СЕР

З результатів моделювання на рис 3.3 видно, що ударний струм в лінії 1 має максимальне значення при аварії в вузлі 2, а також коли аварійні режими (трифазне коротке замикання) в вузлах 3, 4, 8, 9 викликають струми, небезпечні для обладнання, встановленого на ділянці 1-2.

Аналогічно можна розглядати і вимірювати ударний струм в інших зв'язках і визначати місце ушкодження, небезпечне для обладнання в цьому вузлі.

Таким чином, розроблена комп'ютерна модель системи електропостачання району, дозволяє:

- проводити дослідження режимних параметрів в різних режимах роботи електричної мережі сільського району напругою 22 / 0,4 кВ;
- на основі отриманих результатів ударних струмів КЗ можна провести вибір захисту електричного обладнання з використанням плавких запобіжників, автоматичних вимикачів і ін.

3.3. Дослідження процесів в системі електропостачання при масовому пуску асинхронних двигунів

У цьому розділі розглянуто ситуацію, яка обумовлена одночасним запуском декількох асинхронних двигунів в електричній мережі сільськогосподарського району.

Для пуску і зупинки асинхронних двигунів середньої і великої потужності зазвичай виробничі підприємства використовують спосіб прямого пуску (через вимикач), що не дає можливості регулювання швидкості обертання, падіння напруги на лінії живлення досить велике і втрати потужності досить високі.

У зв'язку з розвитком мікроелектроніки і силовій електроніки в деяких сільськогосподарських районах застосовані частотні перетворювачі для керування асинхронними двигунами з перевагами зручного використання, безпеки та економії.

Для здійснення розглянутих можливостей частотно-регульованого електроприводу в роботі досліджені режими масового пуску (одночасного включення) асинхронних двигунів при розміщенні рухового навантаження в мережевих вузлах системи електропостачання сільськогосподарського району (рис. 3.4 і 3.5).

У даній роботі в якості основи для моделювання дизельгенераторних установок використані результати робіт [74-78, 107]. Частотно-регульовані асинхронні електродвигуни надаються згідно з джерелами [86, 101]. Частина навантаження, що представляє, наприклад, побутові споживачі, моделюється статичними характеристиками активної і реактивної потужності споживання за напругою [102, 103].

Характеристика досліджуваної системи електропостачання.

Схема досліджуваної системи електропостачання представлена на рис. 3.4 і 3.5 на базі сільської розподільчої електричної мережі 22 кВ. Схема має одне основне джерело живлення (вузол 1) від ЕЕС і одну установку розподіленої генерації в вигляді дизель-генератора (вузол 18), які підключені за допомогою вимикачів. Потужність дизель-генераторної електростанції становить 725 кВт, сумарна потужність навантаження в системі - 950 кВт, тобто з ЕЕС надходить потужність 225 кВт для живлення навантаження. 900 кВт навантаження системи електропостачання становлять асинхронні двигуни (12 асинхронних навантажень по 75 кВт кожний), решта 50 кВт навантаження - побутові

споживачі, що моделюються статичними характеристиками навантаження по напрузі.

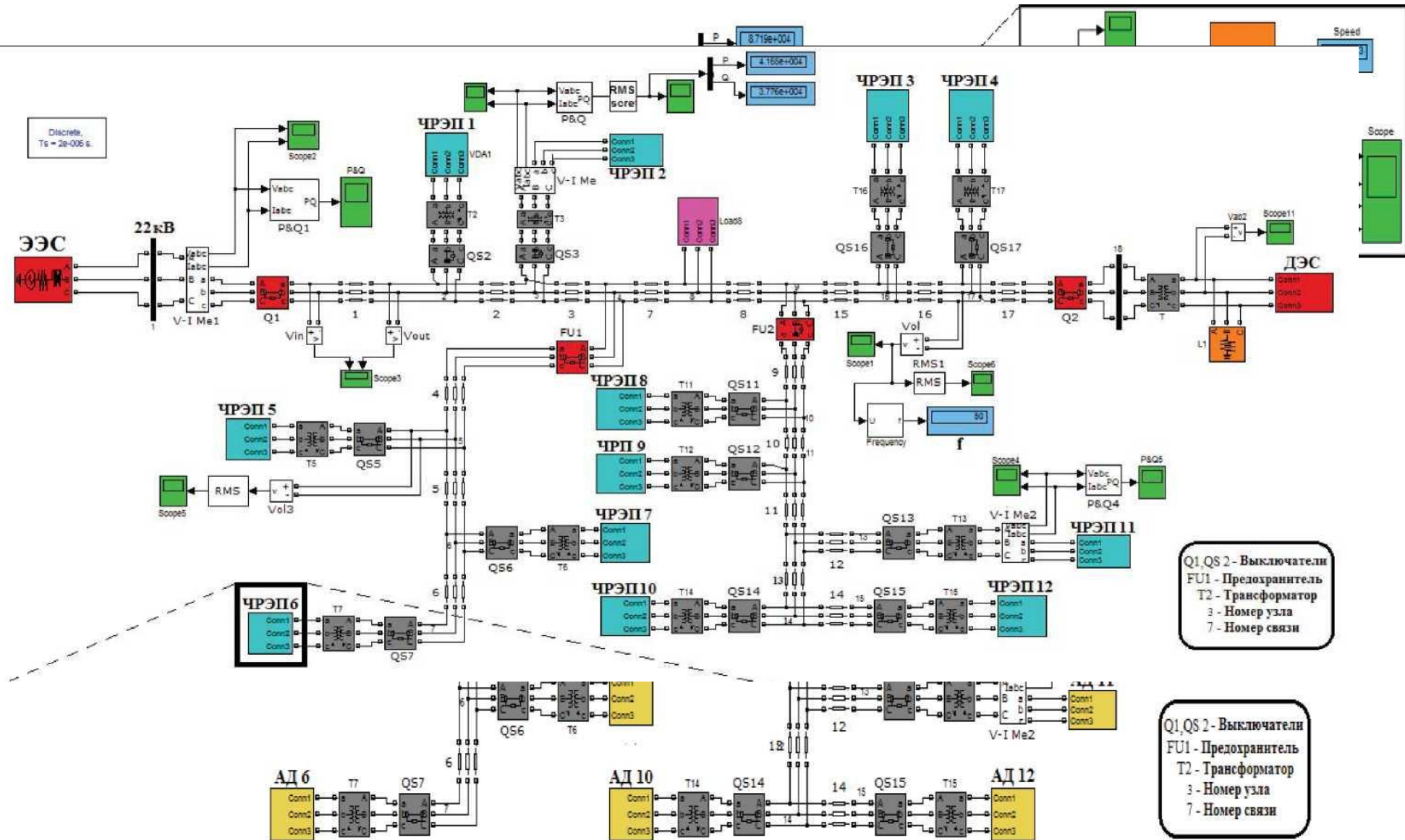


Рис. 3.4. Модель системы электроснабжения при массовому прямому пуску нерегульованих АД

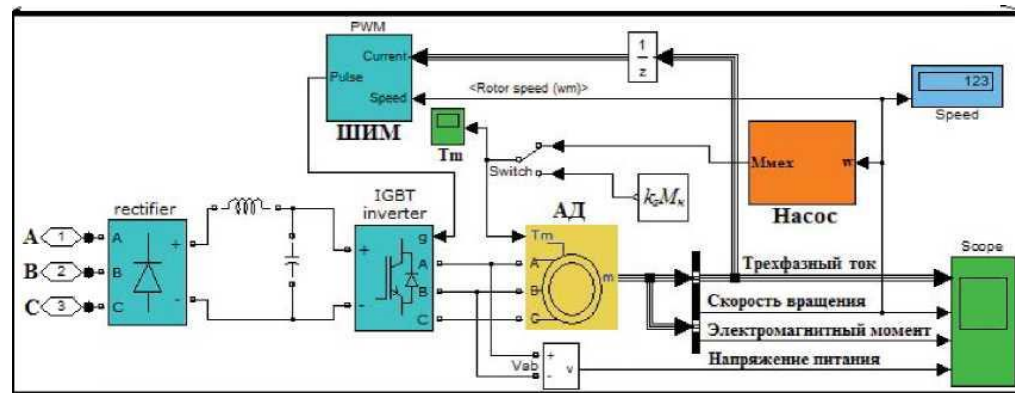
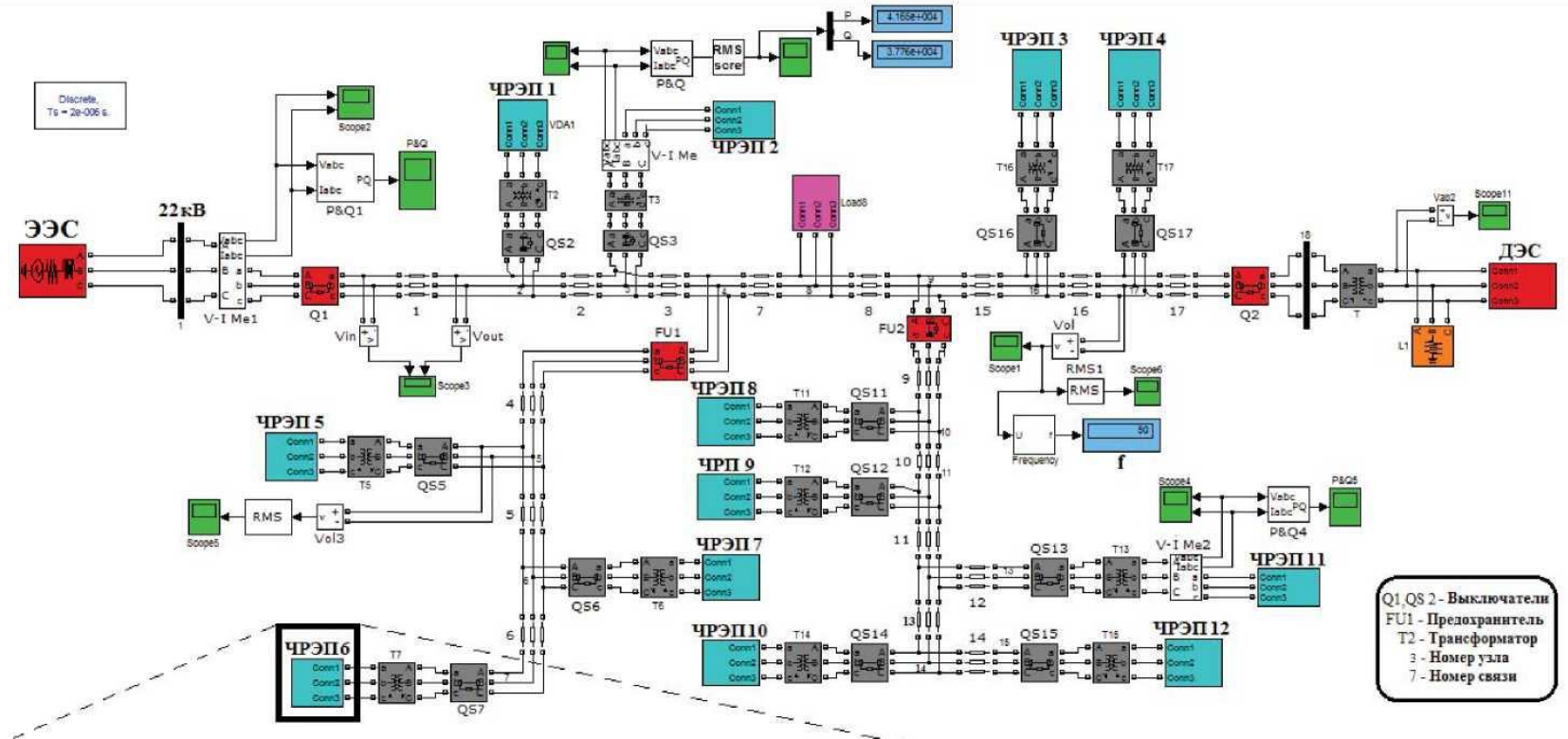


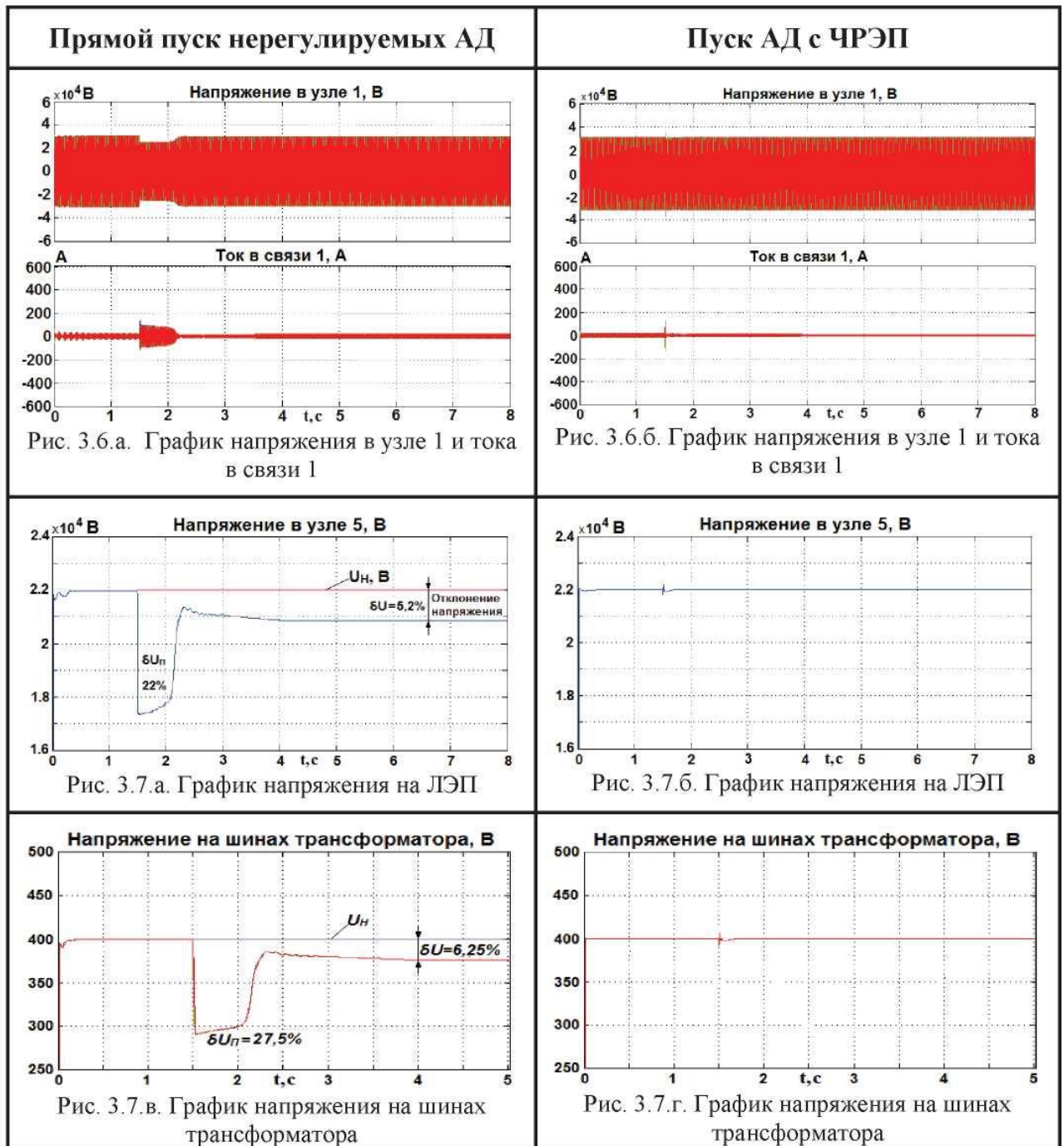
Рис. 3.5. Модель системы электроснабжения при массовом пуске АД з ЧРЕП

Досліджувані сценарії і їх аналіз. Досліджувані сценарії режиму масового пуску в даній системі електропостачання включають:

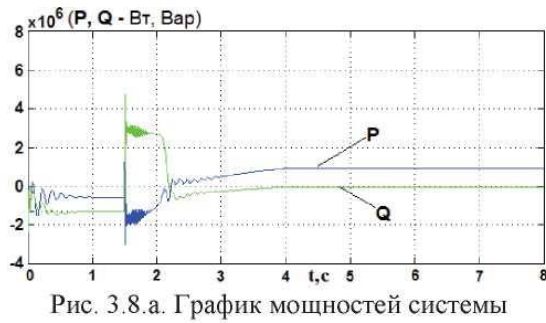
- Масовий пуск нерегульованих асинхронних двигунів.
- Масовий пуск частотно-регульованих АД.

Результати моделювання сценаріїв наведено в табл. 3.4

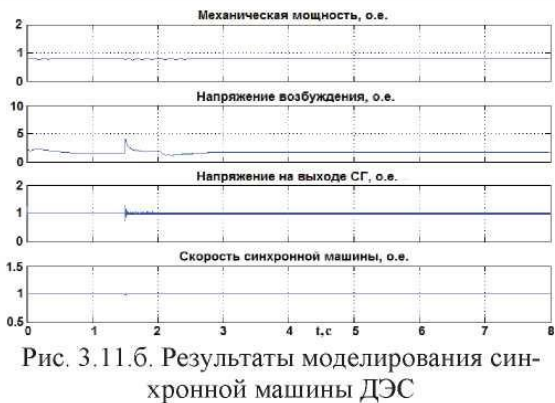
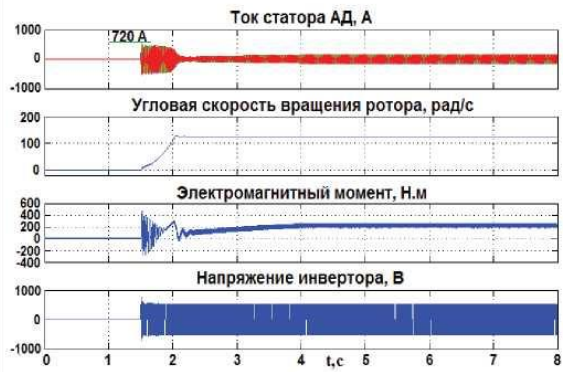
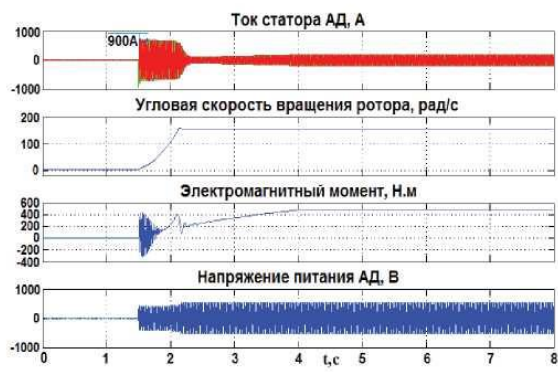
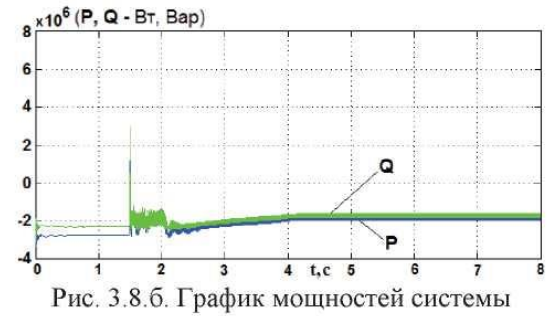
Таблиця 3.4. Результати моделювання при різних способах пуску АД



Прямой пуск нерегулируемых АД



Пуск АД с ЧРЭП



Графіки напруги і струму на рис. 3.6 (а-б) і 3.7 (а-г) показали вплив різних способів масового пуску асинхронних двигунів на якість електропостачання всієї системи. Видно, що традиційний спосіб прямого пуску нерегульованого АД викликає значне падіння напруги на лінії електропередачі (мінімальне значення глибини провалу напруги становить 17,2 кВ, відповідно напруга на лінії падає на 22%), а при пуску АД з ЧРЕП процес розгону двигуна відбувається швидко і плавно, тому падіння напруга на лінії електропередач теж відбувається швидко в меншій мірі (напруга падає до 21,8 кВ тобто зменшується на 1%).

Графіки потужності на рис. 3.8. (а-б) і 3.9. (а-б) показують, що при прямому масовому пуску асинхронних двигунів втрати потужності більше, ніж під час пуску асинхронних двигунів з ЧРЕП.

З рис. 3.10.а і 3.10.б видно, що пуск асинхронних двигунів з частотним регулюванням відбувається швидше, ніж робота нерегульованих асинхронних двигунів. При цьому параметри режиму асинхронного двигуна з частотним регулюванням стабілізуються краще, ніж параметри асинхронного двигуна без частотного регулювання.

На рис. 3.11а і 3.11б показані динамічні характеристики синхронної машини дизельної електростанції при прямому пуску АД і при пуску АД з ЧРЕП. Видно, що масовий пуск АД з ЧРЕП призводить до більш стабільної роботи синхронної машини ДЕС.

Таким чином, розроблена в системі MatlanSimulink модель адекватно представляє основні елементи складної системи електропостачання, що включає установку розподіленої генерації і частотно-регульований асинхронний електропривод. В цілому на основі моделювання можна зробити висновок про переваги використання системи ЧРЕП при масовому пуску АД. Знижується пусковий струм, скорочується час запуску двигунів, зменшуються значення падіння напруги. Все це сприятливо позначиться на електроспоживанні і призведе до його зниження.

Також, можливо, збільшиться термін служби електрообладнання, зокрема обмотки двигуна не будуть перегріватися через великі пускові струми і тривалий час їх дії.

3.4. Дослідження динамічних режимів системи електропостачання при аварійних ситуаціях

У продовження досліджень моделей, представлених в розділі 3.3 (рис. 3.8 і 3.9), в цьому розділі автор розглядає перехідні процеси, які будуть відбуватися в системі електропостачання сільського району при аварійних ситуаціях.

Як ми знаємо, електропостачання споживачів малої і середньої потужності в даний час здійснюється переважно повітряними лініями електропередачі, які є самим ненадійним елементом системи електропостачання. За даними статистики частка повітряних ліній електропередачі в загальній кількості аварійних відключень становить: в міських мережах - до 85%, в сільських мережах - до 95%, причому спостерігається невелика тенденція до щорічного збільшення аварійних відключень.

У суспільстві в останні роки склалася стійка думка про те, що однією з основних причин виникнення аварійних ситуацій в електромережах є глобальна зміна клімату. Дійсно, кліматичний фактор відіграє значну роль у формуванні причин пошкоджень повітряних ліній електропередачі (ВЛЕП). За статистикою основними причинами пошкоджень ПЛ є: надмірні навантаження, вібрація і танець проводів від впливу сильних вітрів; грозові перекриття ізоляції з подальшим обривом дротів і падінням опор і т.д.

У цьому розділі розглянемо моделювання найбільш важкого трифазного короткого замикання на ПЛЕП і динамічні характеристики системи електропостачання внаслідок КЗ.

Характеристика досліджуваної системи електропостачання.

Схема досліджуваної системи електропостачання та ж, як в розділі 3.3.3.

Сценарій І і його аналіз. В сценарії досліджується перехідний процес в системі електропостачання (в чотирьох перших сценаріях досліджено масове використання нерегульованих АТ) і включає такі етапи:

- в початковий момент запускається модель системи ЕЕС з РГ;
- в момент часу $t=1,5$ с запускаються асинхронні двигуни, які використовуються в якості приводу для насосів в системі електропостачання;
- в момент часу $t = 4,75$ с відбувається трифазне коротке замикання на лінії зв'язку 1 поблизу вузла 1;
- в момент часу $t=5,0$ с відбувається відключення лінії зв'язку 1 вимикачем, в результаті чого система електропостачання відключається від основного пункту живлення ЕЕС.

На рис. 3.12-3.19 представлені результати дослідження за сценарієм І:

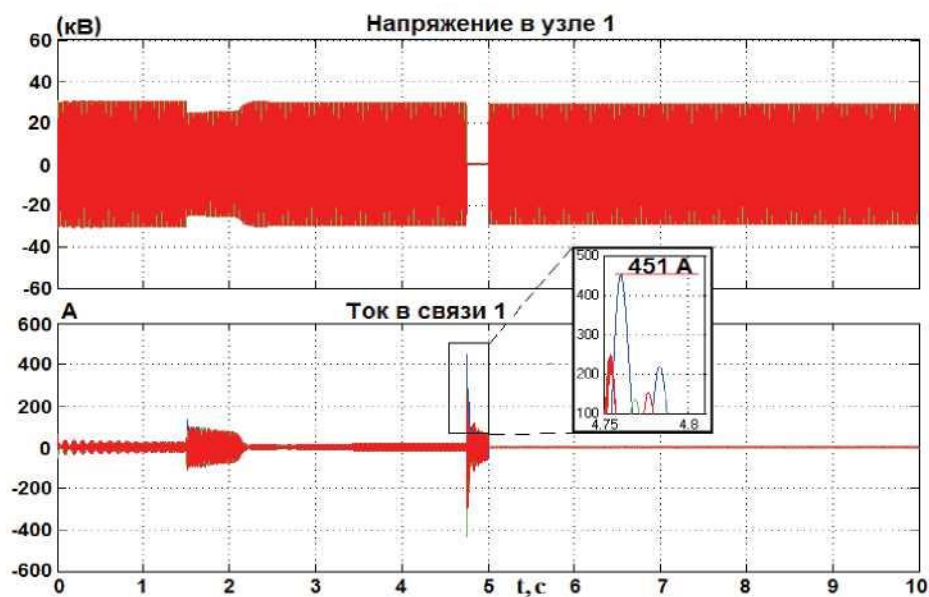


Рис. 3.12. Графіки трифазної напруги у вузлі 1 і струму в лінії зв'язку 1 для сценарію І



Рис. 3.13. Діюче значення напруги у вузлі 1 для сценарію I

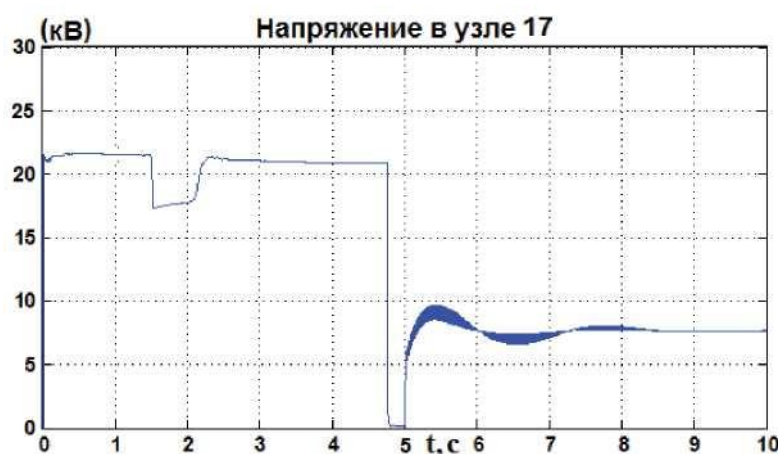


Рис. 3.14. Діюче значення напруги у вузлі 17 для сценарію I

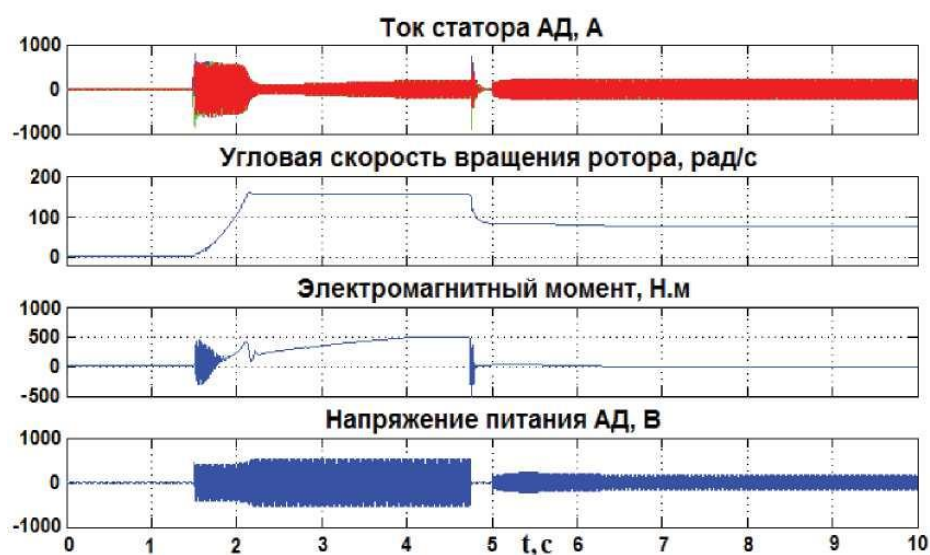


Рис. 3.15. Динамічні характеристики АД для сценарію I

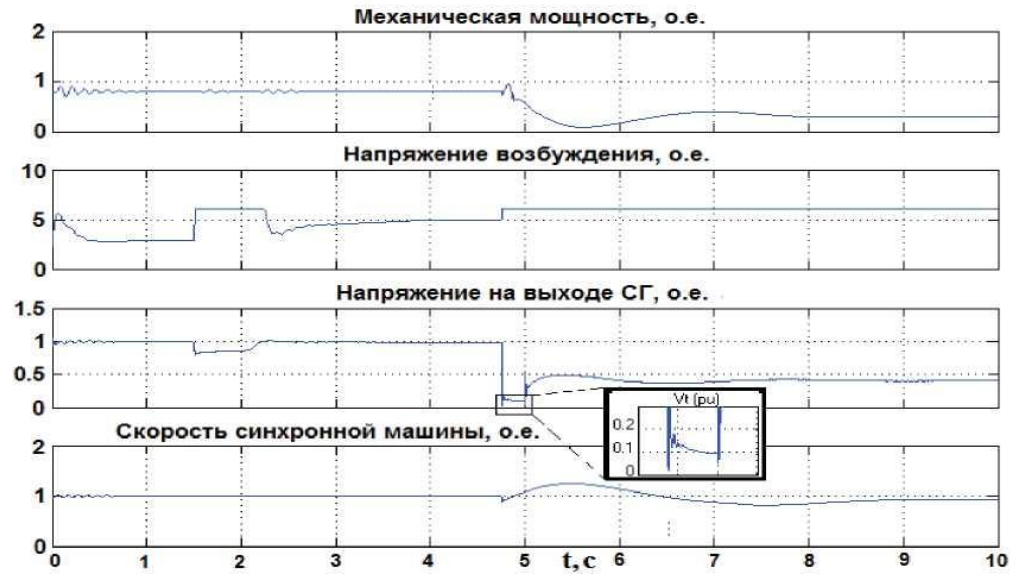


Рис. 3.16. Динамічні характеристики системи для сценарію І



Рис. 3.17. Графік активної і реактивної потужності ЕЕС для сценарію І



Рис. 3.18. Графік потужностей в вузлі 18 (від ДЕС) для сценарію І

З графіків напруги і струмів (рис. 3.12 - 3.14) видно, що при масовому пуску асинхронних двигунів, напруга у всіх вузлах системи сильно знижується (мінімальне значення падіння напруги дорівнює 17,4 кВ, відповідно напруга на лінії падає на 22%). Після короткого замикання (4,75 с) система відключається від ЕЕС і потужності ДЕС не вистачає для живлення навантажень, тому напруга не може досягати номінального значення (22 кВ). Ударний струм в лінії зв'язку 1 під час короткого замикання досягає 451 А.

Як видно з рис. 3.15 і 3.16, одержувані результати дають наочне уявлення про перехідні процеси в двигунах, включаючи процес розгону двигунів і процес відновлення системи після виникнення збою. Через недостатню потужність ДЕС після короткого замикання автоматичний регулятор збудження системи управління ДЕС не може забезпечити підтримання напруги на виході синхронної машини і тому швидкості обертання асинхронних двигунів поступово зменшуються до нуля.

На рис. 3.17 - 3.19 представлені перехідні процеси за потужностями ЕЕС, ДЕС і навантаження, що моделюється статичними характеристиками напруги. Видно, що значення реактивної потужності ДЕС досить велике, при цьому реактивна потужність не пов'язана з виконанням корисної роботи, проте вона необхідна для створення електромагнітного поля, наявність якого є необхідною умовою для роботи електродвигунів і трансформаторів.

Таким чином, в цьому випадку через неприпустимий рівень напруги в мережі струм в статорі двигуна перевищує допустимі значення протягом тривалого часу, що спричиняє перегрів обмотки статора, двигуни не розвивають нормальну швидкість; тому усі двигуни можуть бути пошкоджені.

Щоб вирішити цю проблему, пропонуються такі рішення:

- відключення навантаження для забезпечення балансу потужності;
- підключення ще однієї установки розподіленої генерації в системі.

Сценарій II: відключення навантаження для забезпечення балансу потужності.

При цьому сценарії етапи дослідження виконуються так само, як в сценарії I і доповнюється таким етапом :

- в момент часу 5,0 с: відбувається відключення 225 кВт навантаження (АД3, АД7, АД9 – рис. 3.4) з метою балансування генерації і навантаження (725 кВт) відключають ЕЕС від системи електропостачання;

При моделюванні сценарію II були отримані графіки напруги і струмів в деяких вузлах мережі (рис. 3.20 і 3.21). Як видно з графіків, після відключення короткого замикання (в 5,0 с) напруга у всіх вузлах поступово відновлюється до номінального значення і через 7,9 секунд система стабілізується.

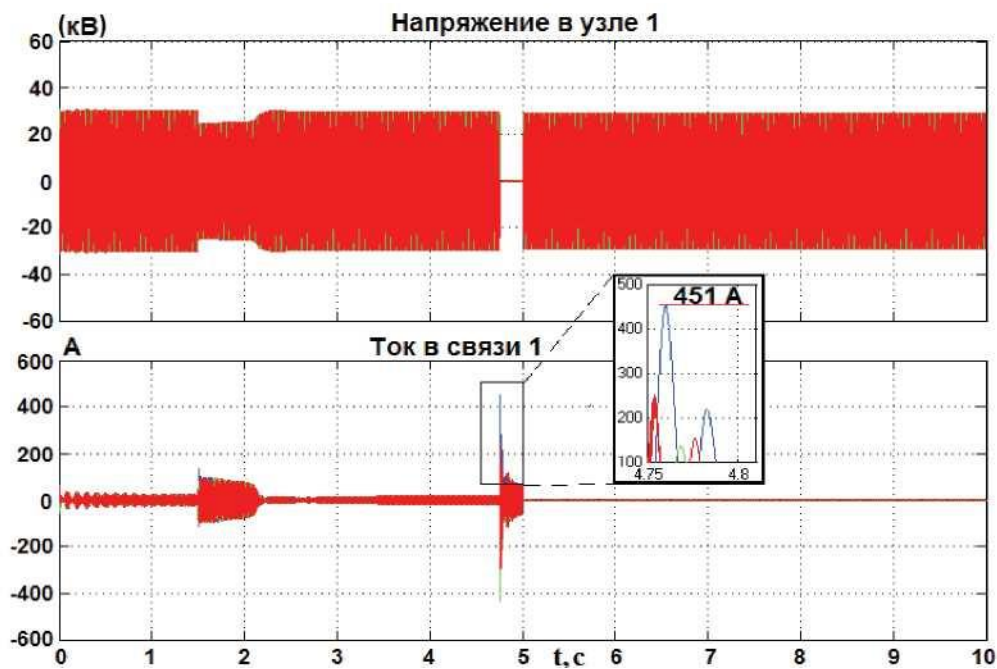


Рис. 3.20. Графіки напруги у вузлі 1 і струм в лінії зв'язку 1 для сценарію II



Рис. 3.21. Діюче значення напруги у вузлі 17 для сценарію II

З графіків динамічних характеристик асинхронних двигунів і синхронної машини, наведених на рис. 3.22 і 3.23, видно, що в порівнянні зі сценарієм I в цьому випадку після відключення навантаження потужність є достатньою для забезпечення живлення всієї системи.

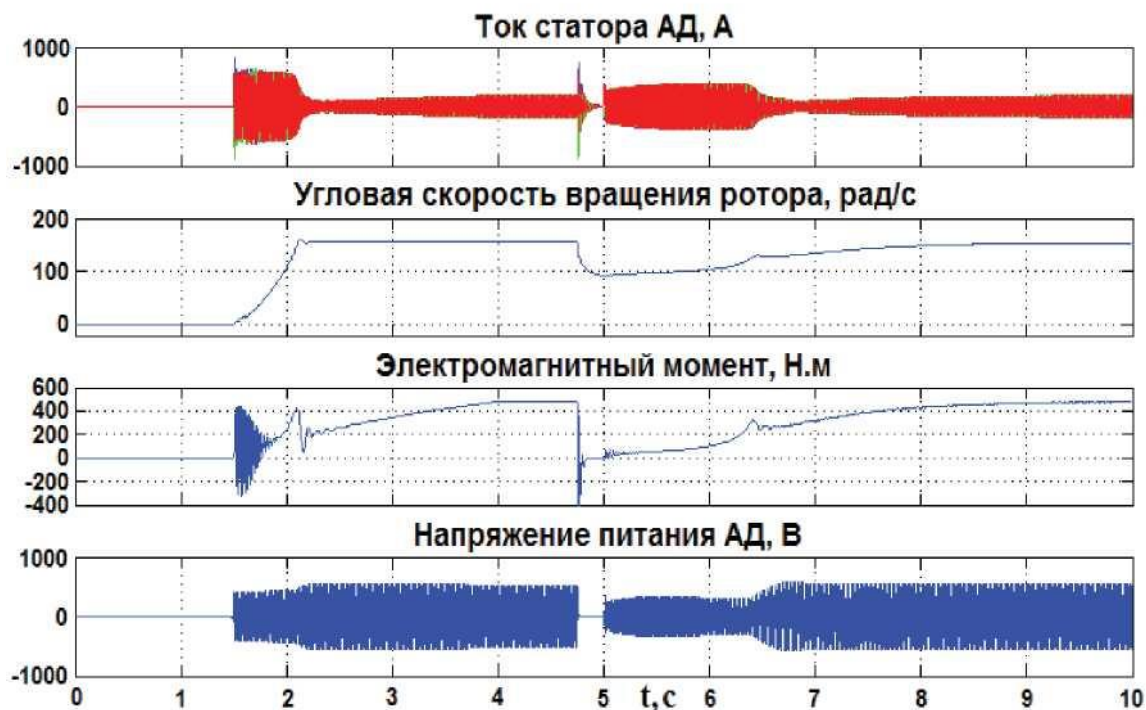


Рис. 3.22. Динамічні характеристики АД для сценарію II



Рис. 3.23. Динамічні характеристики СМ для сценарію II

Тому асинхронний двигун може працювати нормально після короткого замикання і напруга на виході синхронної машини теж досягає номінального значення.

На рис. 3.24 - 3.26 наведені графіки активної і реактивної потужності ЕЕС, ДЕС і потужності навантаження, що моделюється статичними характеристиками по напрузі. Видно, що потужності ЕЕС не змінюються в порівнянні зі сценарієм I через відключення зв'язку 1 від основного пункту живлення (ЕЕС) при виникненні короткого замикання. Графіки потужності дизельної електростанції показують, що взаємопов'язана зміна генерованої потужності забезпечує роботу двигунів, і тому споживання реактивної потужності в ДЕС після аварії менше, ніж в сценарії I.

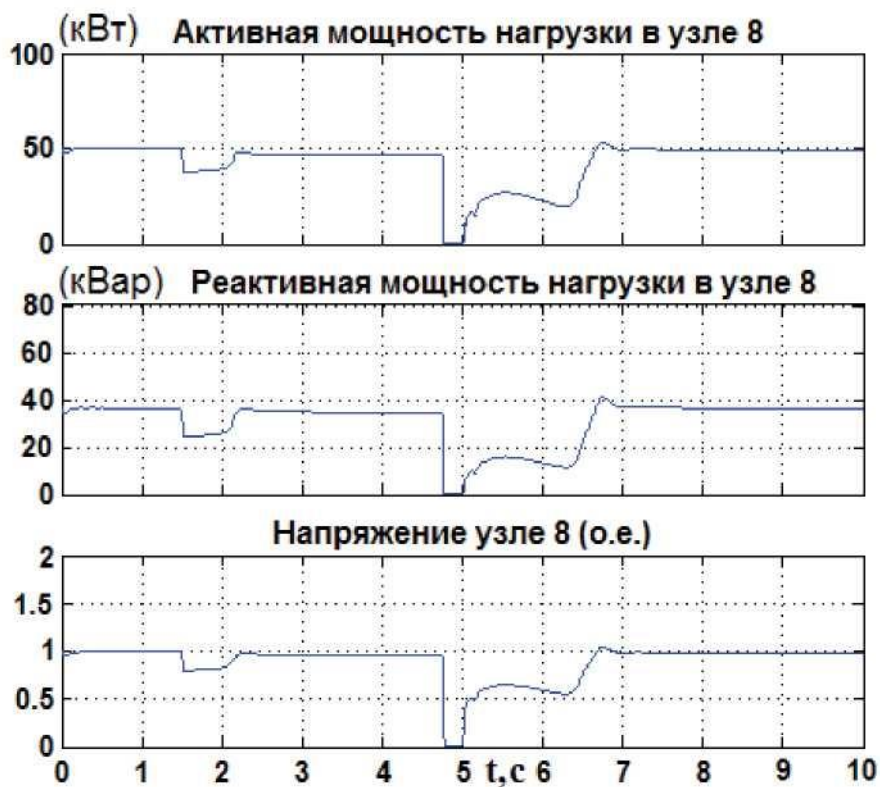


Рис. 3.24. Графік активна і реактивна потужності навантаження для сценарію II



Рис. 3.25. Графік активної і реактивної потужностей ЕЕС для сценарію II



Рис. 3.26. Графік потужності у вузлі 18 (від ДЕС) для сценарію II

3.5. Дослідження стійкості системи електропостачання при різних довжині лінії між генераторами

У цьому розділі розглянемо ситуації підключення ще однієї установки розподіленої генерації в системі при різних довжині лінії між генераторами.

Сценарій III: підключення ще однієї установки розподіленої генерації в системі (довжина лінії представлена в таблиці 3.5). Опис моделі наведено в розділі 3.2. Відмінність моделі від сценарії I полягають в тому, що в цьому випадку включається ще одна дизельна електростанція у вузлі 14, як показано на рис. 3.27.

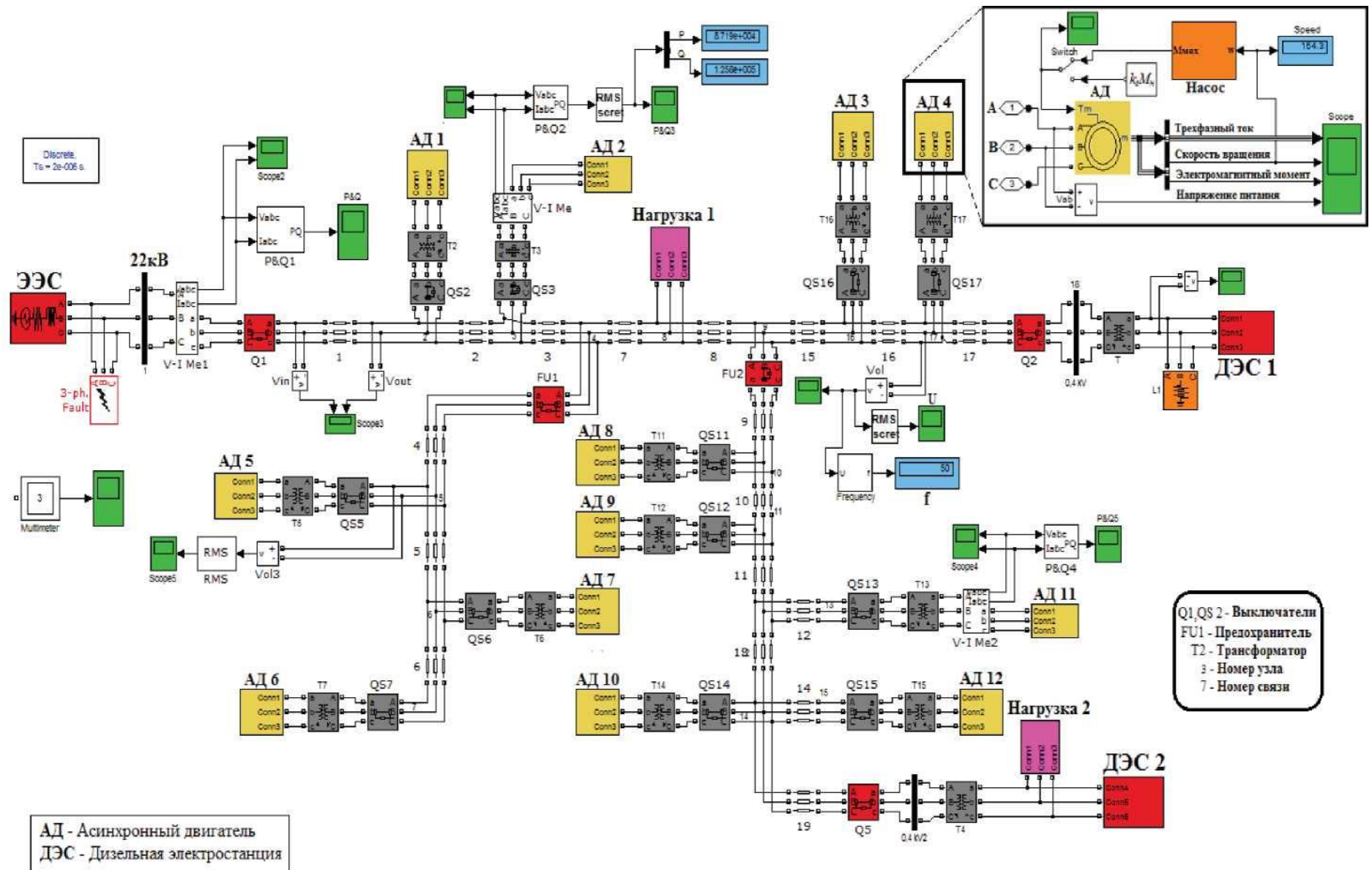


Рис. 3.27. Модель системи електропостачання при підключенні другої ДЕС

Потужність ДЕС 2 становить 725 кВт, вона живить навантаження 2 потужністю 725 кВт.

Етапи дослідження такі само, як і в сценарії I. Результати дослідження за сценарієм III представлені на рис. 3.28 - 3.36.

На рис. 3.28 - 3.30 видно, що в цьому випадку сума потужності джерел живлення більше (два джерела живлення - ДЕС), тому зменшується час пуску асинхронних двигунів і час падіння напруги, і менше значення падіння напруги (мінімальне значення падіння напруги дорівнює 1,8 кВ і відповідно падіння напруги на лінії становить на 18%), ніж в сценарії I і система стабілізується через 5,9 секунд. Але в цьому випадку великим є ударний струм (669 А) при КЗ в системі (рис. 3.28).

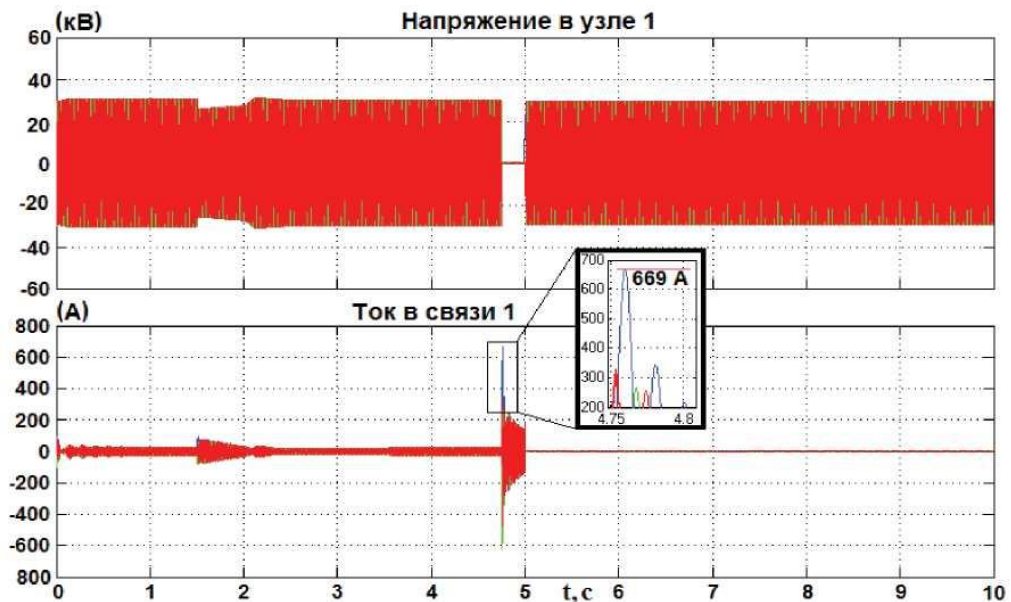


Рис. 3.28. Графіки напруги у вузлі 1 і струму в лінії зв'язку 1 для сценарію III

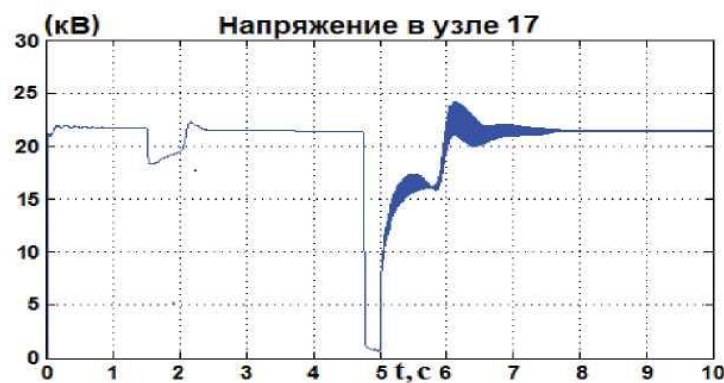
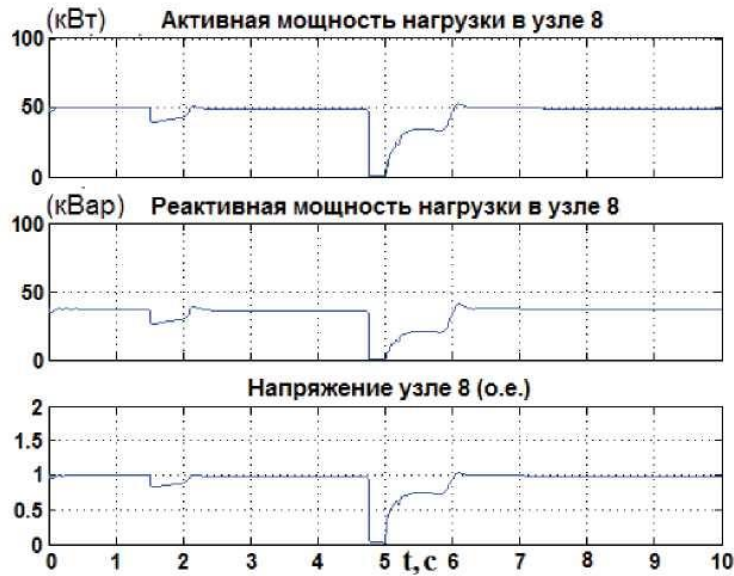


Рис. 3.29. Діюче значення напруги у вузлі 17 для сценарію III



На рис. 3.31 - 3.33 показані графіки динамічних характеристик асинхронних двигунів і синхронної машини. Видно, що в цьому випадку час розгону АД при пуску системи скоротився до 0,55 с (в сценарії I час розгону дорівнював 0,8 с). Після пошкодження вся система швидше повертається до сталого режиму і швидкість обертання ротора синхронного генератора менше коливається, ніж в першому і другому випадках, динамічні характеристики СМ в ДЕС 1 і ДЕС 2 трохи відрізняються.

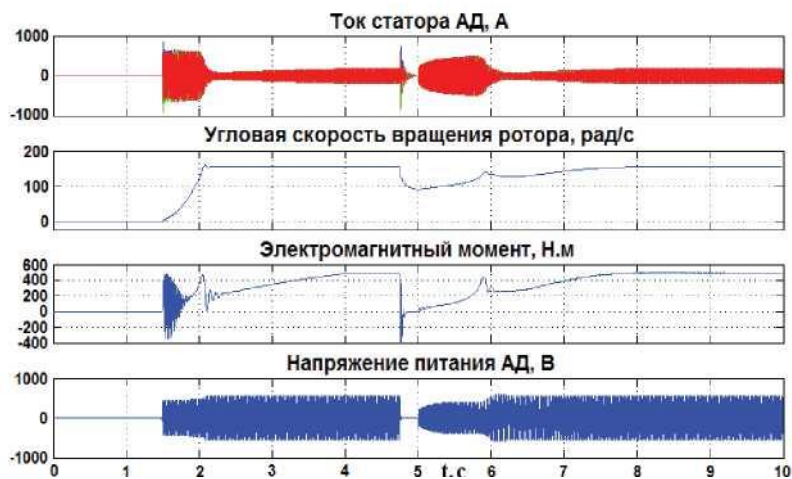




Рис. 3.32. Динамічні характеристики СМ ДЕС1 для сценарію III

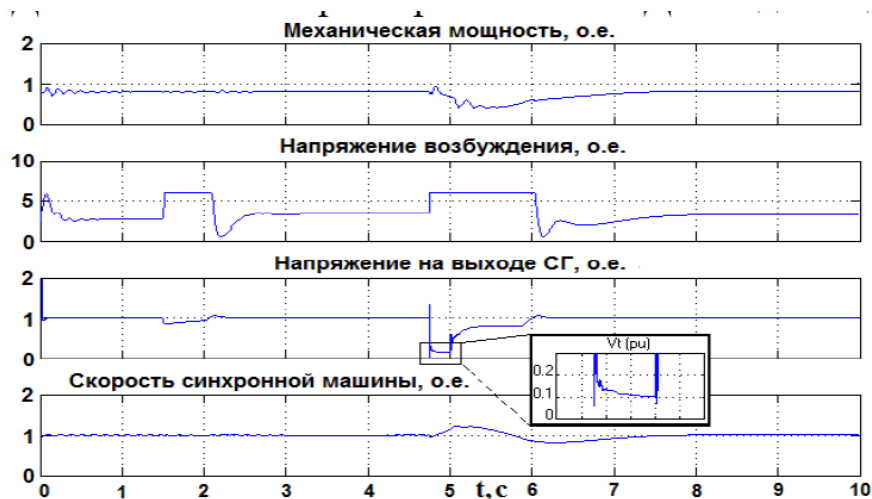


Рис. 3.33. Динамічні характеристики СМ ДЕС2 для сценарію III

На рис. 3.34 - 3.36 наведені графіки активної і реактивної потужності ЕЕС, ДЕС 1 і ДЕС 2. З графіків видно, що активна потужність дизельної електростанції також становить значення 725 кВт, коли система в сталому режимі, і різниця тільки в тому, що перехідний процес активної потужності відбувається швидше в порівнянні з двома вищезгаданими сценаріями. У цьому випадку зменшення реактивної потужності покращує показники роботи енергосистеми і зменшує витрату палива на дизельної електростанції.



Рис. 3.34. Графік активної і реактивної потужності ЕЕС для сценарію III



Рис. 3.35. Графік потужності , що віддається ДЕС1 у вузлі 18

Сценарій IV: в систему електропостачання підключається ще одна установки розподіленої генерації і збільшується довжина лінії, що зв'язує джерела ДЕС 1 і ДЕС 2.

Як ми бачили в першому випадку, оскільки відстань від ЕЕС до ДЕС 1 не дуже велика, тому при аварії ДЕС постраждає досить серйозно, в результаті чого відбувається велике падіння напруги (напруга на виході синхронної машини залишається 0,11 в.о.), і отже, генератору ДЕС майже не вистачає часу, щоб відновитися для підтримки напруги на шинах двигунів.

Розглянемо поведінку ДЕС 1 і ДЕС 2 при збільшенні довжини лінії, що зв'язує джерело розподіленої генерації ДЕС 1 з системою, для чого збільшом довжину гілки 15 - 17, а саме: гілка 15 - довжина 15 км (раніше довжина 1,342

км), гілка 16 - довжина 20 км (раніше довжина 1,02 км) і гілка 17 - довжина 25 км (раніше довжина 2,1 км). Досліджувані етапи виконуються так само, як в сценарії I. Результати дослідження сценарії IV представлені на рис. 3.37-3.42.

На рис. 3.37 - 3.39 наведені графіки напруги в деяких вузлах мережі і ударного струму в лінії зв'язку 1. Як видно з графіка при короткому замиканні ударний струм дорівнює 590 А (рисунок 3.37), менше ніж в сценарії III. Графіки напруги (рисунок 3.38) показують, що при аварії напруга у вузлі 17 знижується менше, що забезпечує найкращі умови роботи всієї системи.

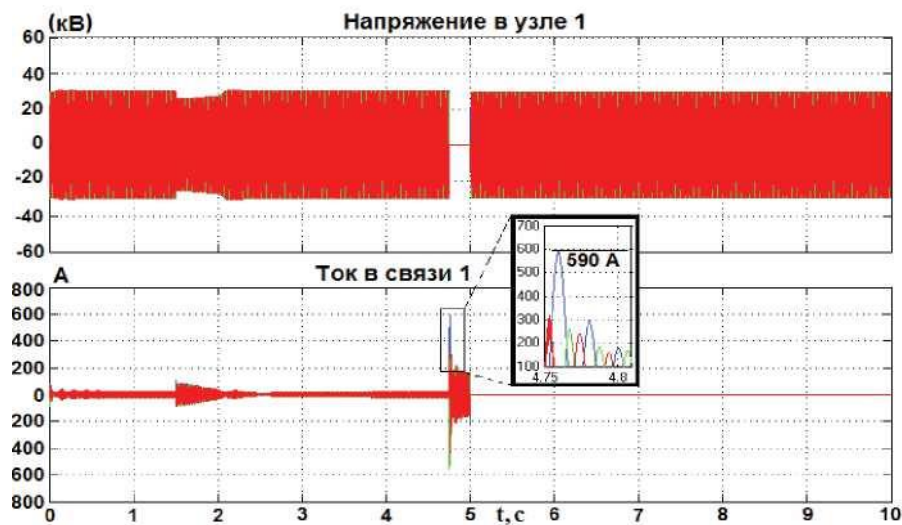


Рис. 3.38. Діюче значення напруги у вузлі 17 для сценарію IV

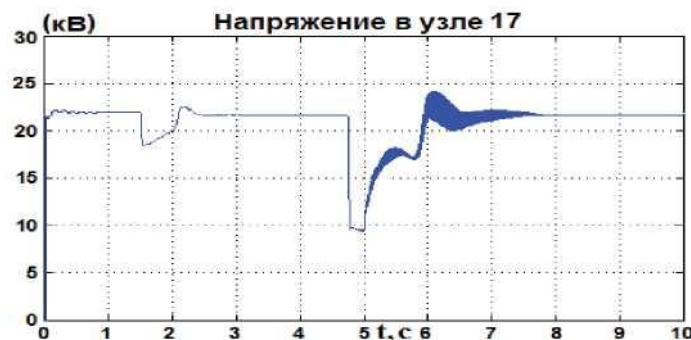


Рис. 3.37. Графік напруги в вузлі 1 і струм в лінії зв'язку 1 для сценарію IV

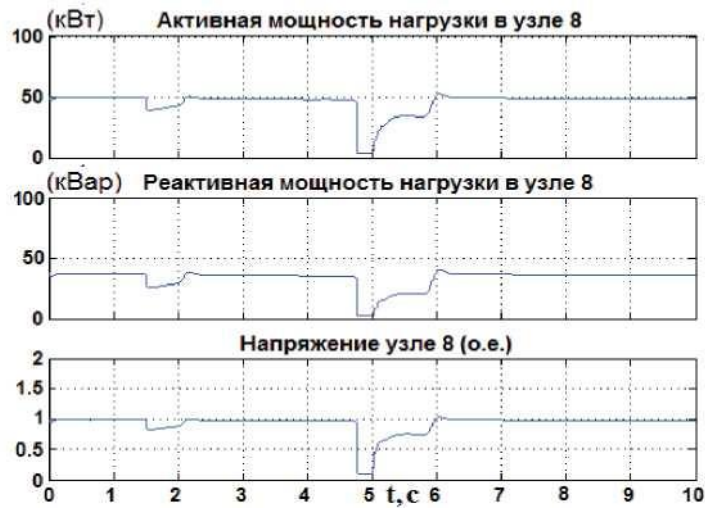


Рис. 3.39. Графіки напруги і потужності навантаження у вузлі 8 для сценарію IV

Графіки динамічних характеристик асинхронних двигунів і синхронних машин наведені на рис. 3.40 - 3.42. Видно, що в цьому випадку асинхронні двигуни можуть працювати після відключення системи електропостачання від ЕЕС, швидкість АД менше падає і велика плавність досягається при русі до сталого значення внаслідок підтримки напруги живлення АД.

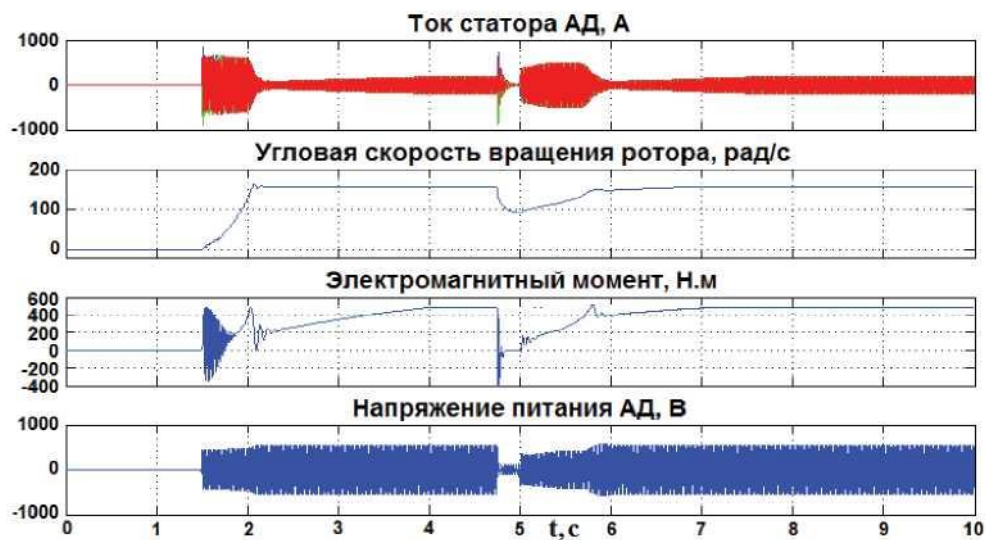


Рис. 3.40. Динамічні характеристики АД для сценарію IV

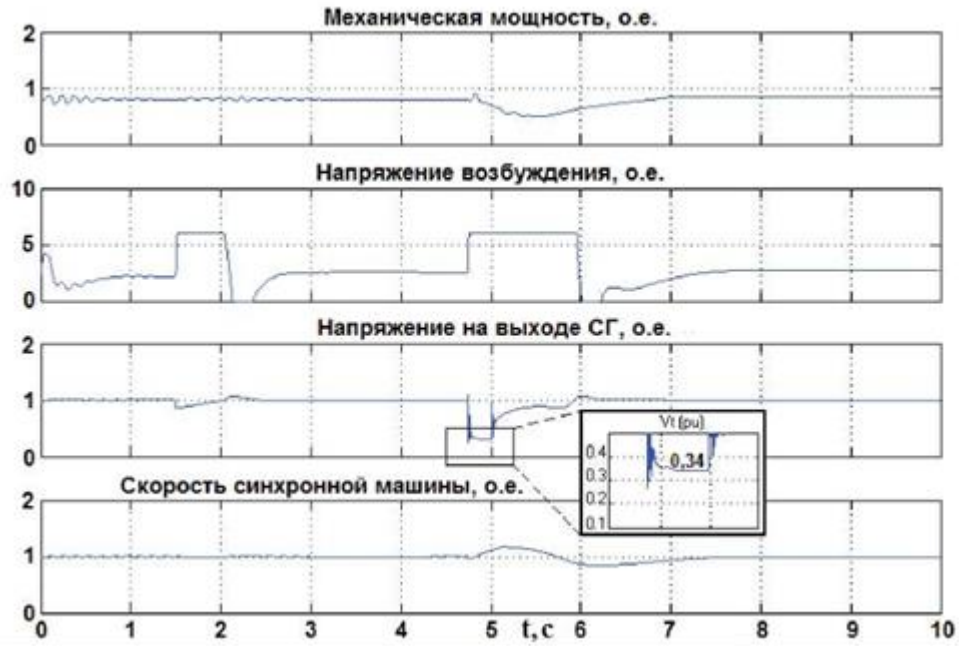


Рис. 3.41. Динамічні характеристики СМ ДЕС1 для сценарію IV

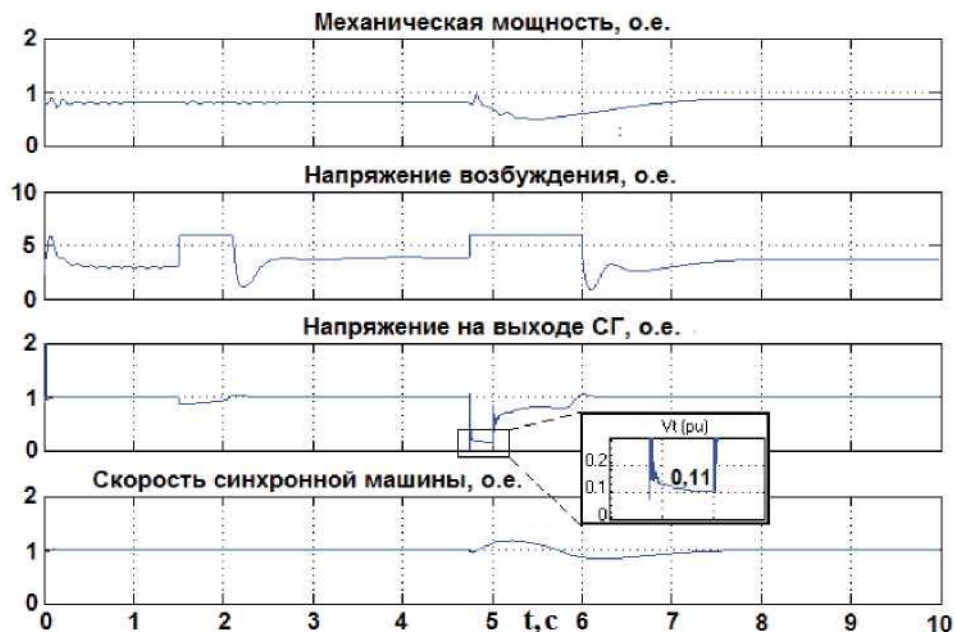


Рис. 3.42. Динамічні характеристики СМ ДЕС2 для сценарію IV

У порівнянні зі сценарієм III, в даному сценарії напруга на шинах синхронної машини ДЕС1 підтримується краще і під час аварії зменшується на значення 0,34 в.о.

Графіки на рис. 3.43 показують, що при пуску АД перехідний процес за потужністю не змінюються в порівнянні зі сценарієм III, але відбувається швидше, ніж в сценарії I.



Рис. 3.43. Графік активної і реактивної потужності ЕЕС для сценарію IV

На рис. 3.44 - 3.45 показані графіки активної і реактивної потужності ДЕС 1 і ДЕС 2. З графіків видно, що перехідний процес активної потужності в віддаленій ДЕС 1 має великі коливання, але реактивна потужність в сталому режимі знижувалася до нуля, що свідчить про покращення умов для роботи АД (рис. 3.40).



Рис. 3.44. Графік потужності, що віддається ДЕС1 у вузлі 18 для сценарію IV



Рис. 3.45. Графік потужності, що віддається ДЕС2 в узелі 14 для сценарію IV

3.6. Розробка заходів з підвищення динамічної стійкості системи електропостачання при масовому використанні частотно-регульованого електропривода

Результати досліджень в попередніх розділах показали, що управління динамічною поведінкою досліджуваної системи можна реалізувати регулюванням і управлінням асинхронними двигунами. Як уже згадувалося в попередніх розділах, для зменшення економічних витрат, підвищення надійності електропостачання та оптимальних режимів роботи асинхронних двигунів впровадження частотно-регульованого електроприводу є одним з найбільш ефективних заходів.

На практиці показано, що використання частотних перетворювачів у всіх сферах життя дає багато переваг. Реалізація проекту використання ЧРЕП дозволяє досягти двох основних цілей: знизити витрати електроенергії, води і значно знизити ймовірність аварій в системах зрошення, а також в живильних мережах.

У цьому розділі розглянемо динамічну поведінку досліджуваної системи електропостачання при масовому використанні ЧРЕП. Характеристика досліджуваної системи електропостачання описана в розділі 3.3.

Сценарій V: Досліджується система електропостачання, що показана на рис. 3.46, при масовому використанні ЧРЕП.

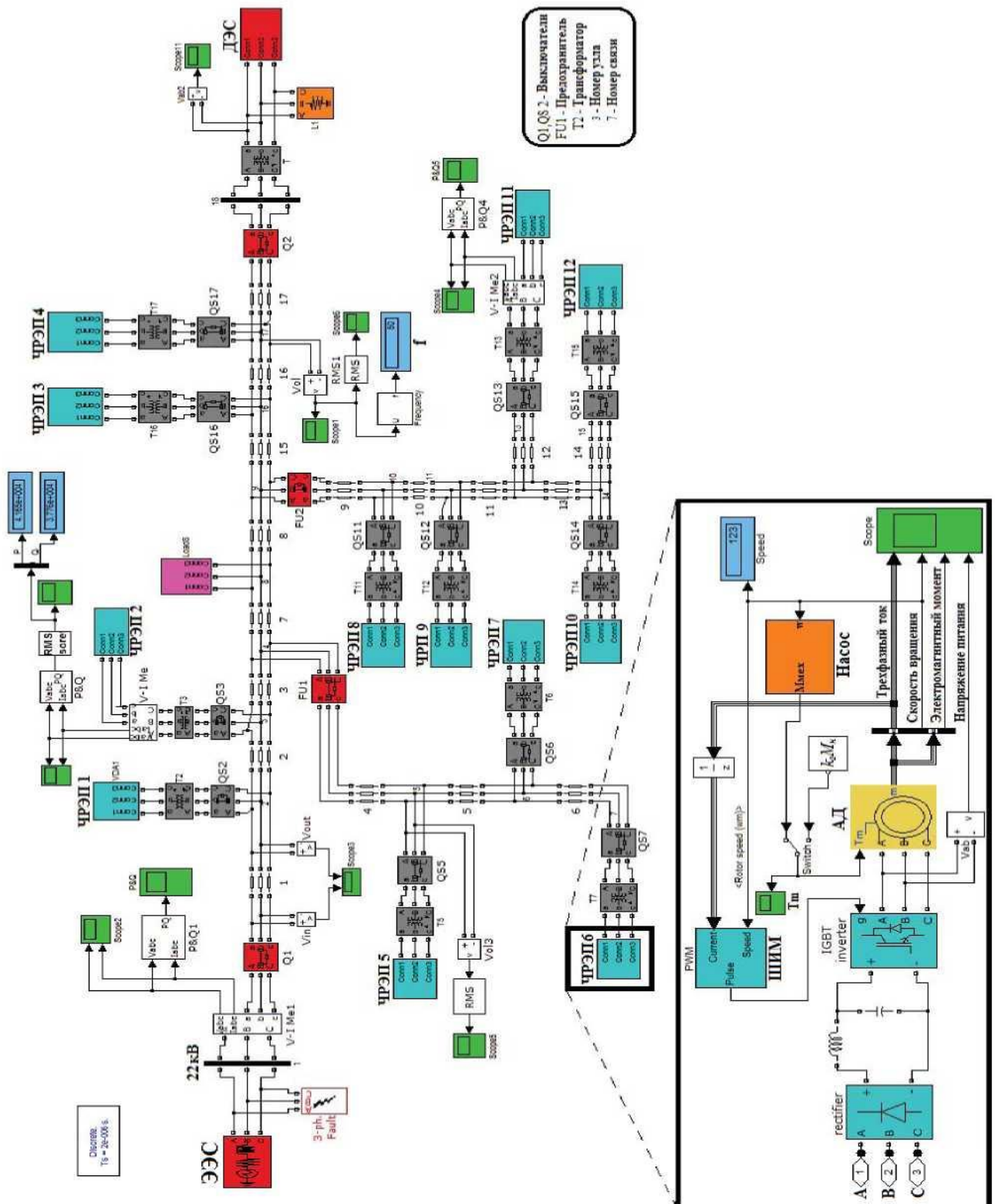


Рис. 3.46. Модель системи електропостачання з розподіленою генерацією і масовим частотно-регульованим електроприводом при аварійних ситуаціях

Сценарій V передбачає такі і етапи:

- в початковий момент запускається модель системи ЕЕС з РГ;
- в момент часу $t = 1,5$ с запускаються ЧРЕП, що використовується в якості приводу для насосів в системі електропостачання;
- в момент часу $t = 4,75$ с відбувається трифазне коротке замикання на лінії зв'язку 1 поблизу вузла 1;
- в момент часу $t = 5,0$ с відбувається відключення лінії зв'язку 1 вимикачем, в результаті чого система електропостачання відключається від основного пункту живлення ЕЕС.

При моделюванні і дослідженні масового використання частотно-регульованих електроприводів в системі електропостачання з розподіленою генерацією сільських районів (рисунок 3.46) отримані результати, показані на рис. 3.47 - 3.54.

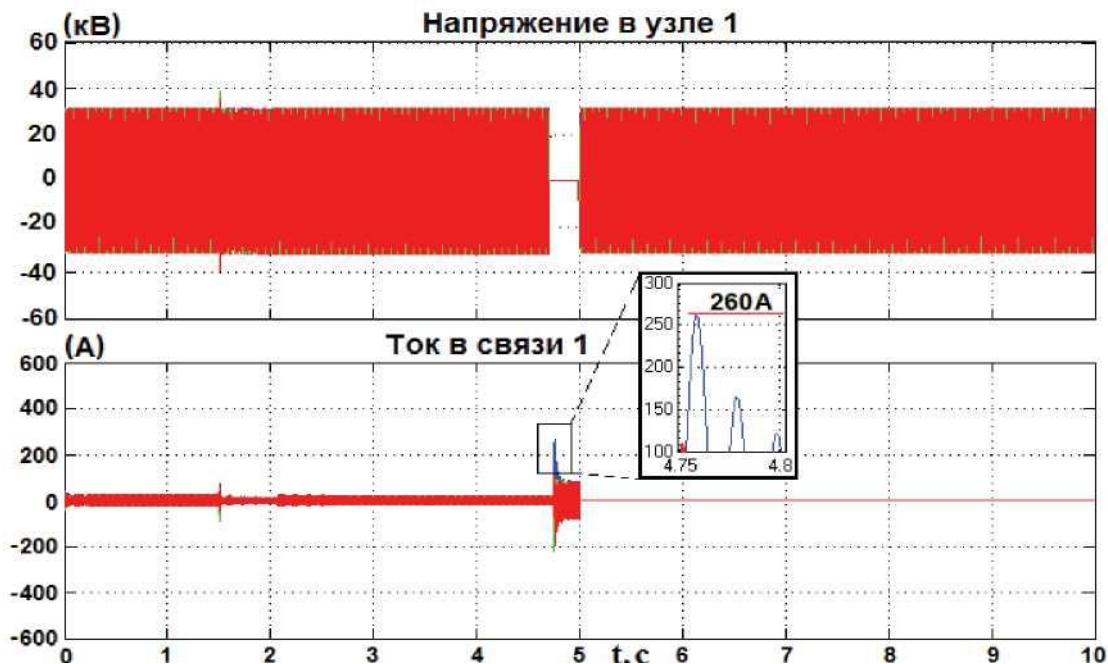


Рис. 3.47. Графік напруги у вузлі 1 і струму в лінії зв'язку 1 для сценарію V



Рис. 3.48. Діюче значення напруги в вузлі 17 для сценарію V

На рис. 3.47 і 3.48 показані графіки напруги в деяких вузлах мережі і ударного струму в зв'язку 1. Як видно з графіка струму, при короткому замиканні ударний струм дорівнює приблизно 260 А, менше, ніж у всіх чотирьох сценаріях в розділах 3.4 і 3.5. Графіки напруги показують, що процес пуску асинхронних двигунів мало і швидко впливає на роботу системи електропостачання. Оскільки процес розгону двигуна відбувається швидко і частотний перетворювач дозволяє обмежити пусковий струм, тому падіння напруга теж відбувається швидко (1,0 с) і в меншій мірі (напруга падає до 21,8 кВ тобто зменшується на 1%). Після короткого замикання вся система також швидше відновлюється.

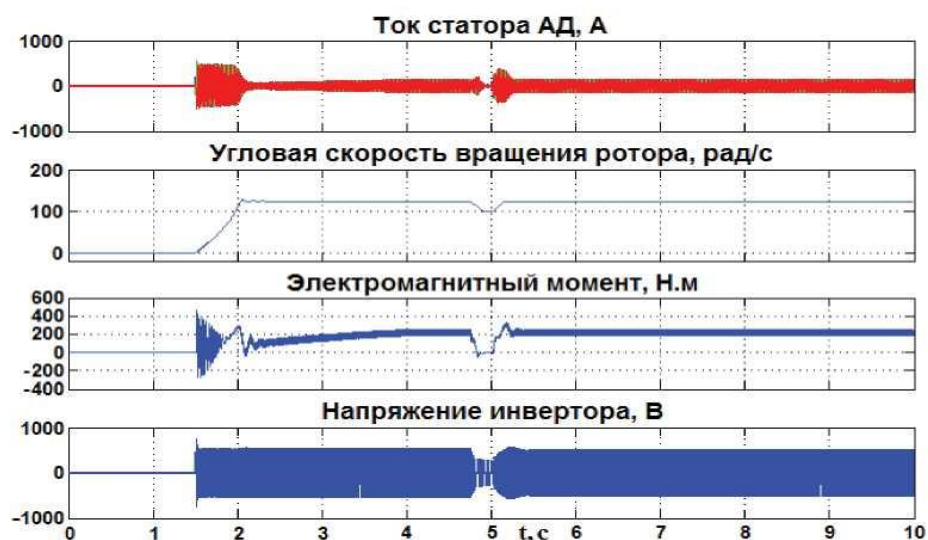


Рис. 3.49. Динамічні характеристики АД з ЧРЕП для сценарії V

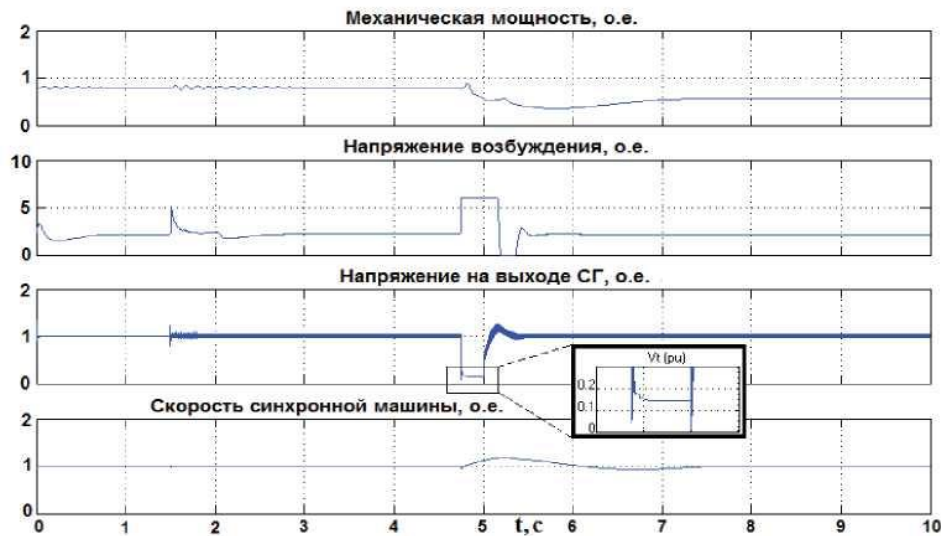


Рис. 3.50. Динамічні характеристики СМ ДЕС для сценарії V

Динамічні характеристики частотно-регульованих асинхронних двигунів і синхронної машини наведені на рис. 3.49 і 3.50. У порівнянні попередніми сценаріями видно, що масовий пуск асинхронних двигунів з частотним регулюванням відбувається швидше, ніж асинхронних двигунів без частотного регулювання (підтримує процес так само, як пуск одного двигуна з ЧРЕП). При цьому параметри режиму асинхронного двигуна з частотним регулюванням стабілізуються краще, ніж нерегульованого асинхронного двигуна. Частотно-регульований асинхронний двигун поводить себе стабільніше також під час короткого замикання і після його відключення до моменту відключення надлишкового навантаження і після цього моменту (інвертор ЧРП підтримує напругу живлення). Це підтверджують криві зміни напруг і струмів статорів двигунів, електромагнітних моментів і кутових швидкостей роторів, представлені на рис. 3.49.

Розглянемо графіки динамічних характеристик синхронної машини дизельної електростанції, представлені на рис. 3.50. З цих графіків видно, що реакція дизельної електростанції на зміни параметрів режиму системи також відбувається швидше і стабільніше, ніж для попередніх сценаріїв [104].

На рис. 3.51 і 3.52 приведені графіки за активною та реактивною потужністю ЕЕС, ДЕС. З графіків видно, що значення активної потужності

дизельної електростанції фіксувалося на 725 кВт, перехідний процес відбувається швидко і система швидко повертається в усталений режим. В цьому випадку реактивна потужність ЕЕС майже дорівнює нулю і реактивна потужність ДЕС теж невелика і викликає поліпшення показників роботи енергосистеми і зменшення витрати палива дизельною електростанцією. Після короткого замикання і відключення від основного пункту харчування ЕЕС за рахунок регулювання швидкості частотних перетворювачів зменшується споживана потужність в системі, що дозволяє пом'якшити наслідки аварій і забезпечує стабільну роботу обладнання.

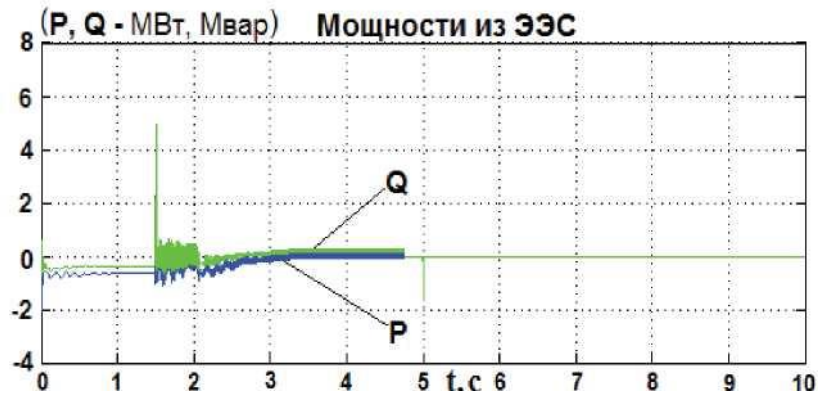


Рис. 3.51. Графік активної і реактивної потужностей ЕЕС для сценарію V



Рис. 3.52. Графік активної і реактивної потужностей ДЕС для сценарію V

На рис. 3.53 представлені осцилограми лінійної напруги, що ілюструють спектральний склад напруги на шинах трансформатора при включенні однієї

установки розподіленої генерації в системі електропостачання. Видно, що рівень сумарних коефіцієнтів гармонійних складових напруги ($K_i = 8,81\%$) в гранично допустимих значеннях.

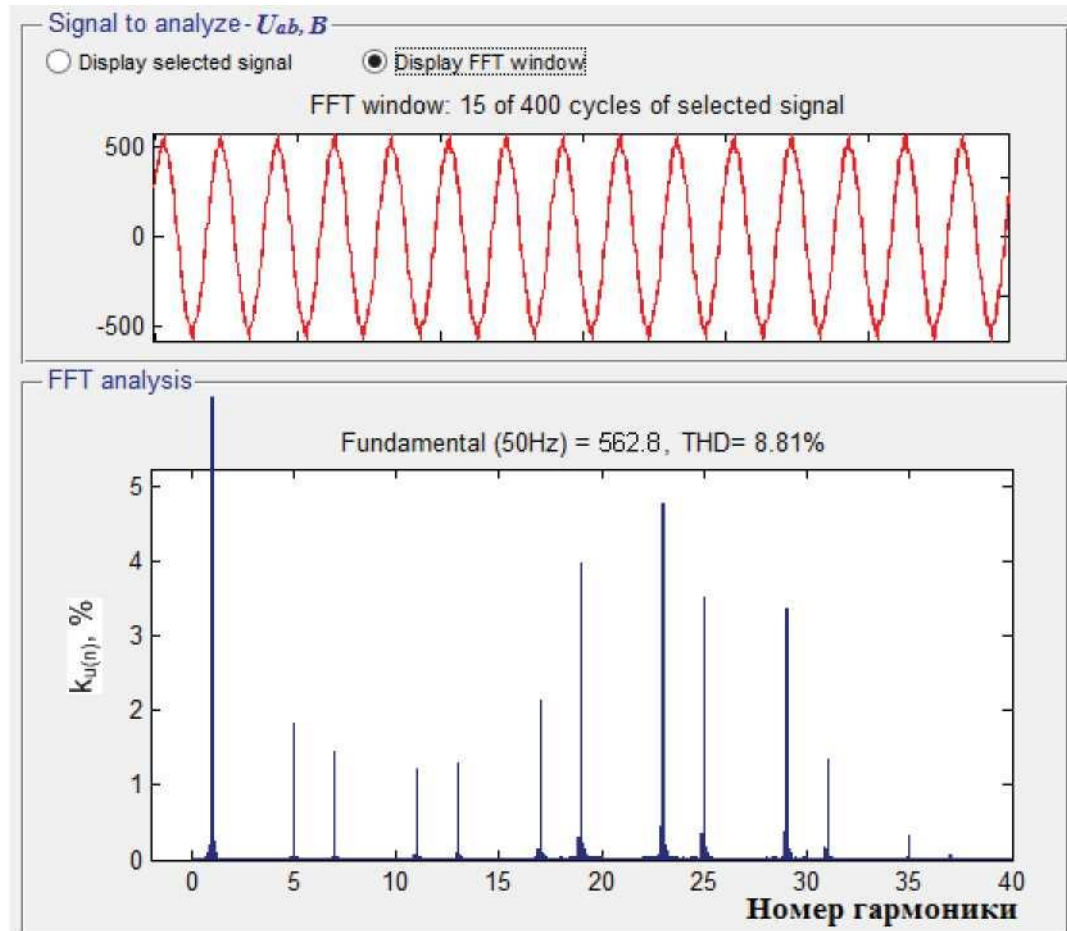


Рис. 3.53. Осцилограма напруги і спектральний склад напруги U_{ab} на шинах трансформатора при підключенні однієї установки РГ в СЕС

Сценарій VI: в систему електропостачання підключається ще одна установка розподіленої генерації в системі при масовому застосуванні ЧРЕП. Відмінність моделі від сценарії V полягає в тому, що в даному випадку додана одна дизельна електростанція в вузлі 14, як показано на рис. 3.54. Потужність ДЕС 2 становить 725 кВт, вона живить свою навантаження2 потужністю 725 кВт.

Етапи дослідження такв само, як в сценарії IV. Результати дослідження сценарії VI представлені на рис. 3.55 -3.60.

На рис. 3.55 -3.56 наведені графіки напруги в деяких вузлах мережі і ударного струму в зв'язку 1. Як видно з графіка струму, при короткому замиканні ударний струм дорівнює приблизно 480 А (рисунок 3.55), менше ніж в сценарії III (669 А). Але в цьому випадку при короткому замиканні ударний струм більше в порівнянні зі сценарієм V (260 А). Після короткого замикання напруга на лінії електропередачі швидше відновлюється.

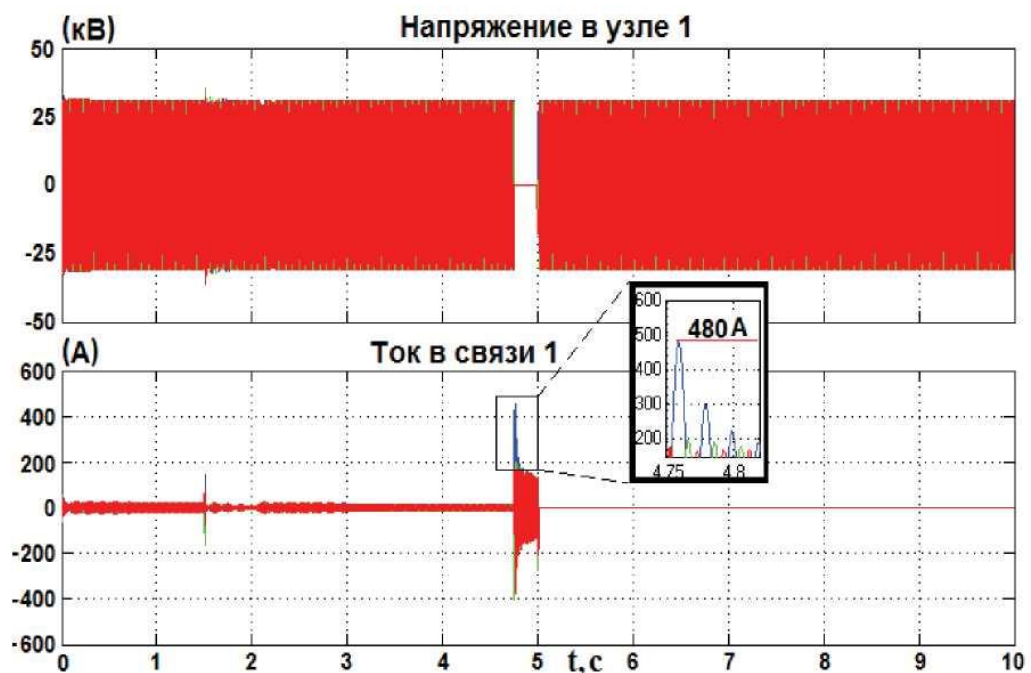


Рис. 3.55. Графік напруги в вузлі 1 і струм в лінії зв'язку 1 для сценарію VI



Рис. 3.56. Діюче значення напруги у вузлі 17 для сценарію VI

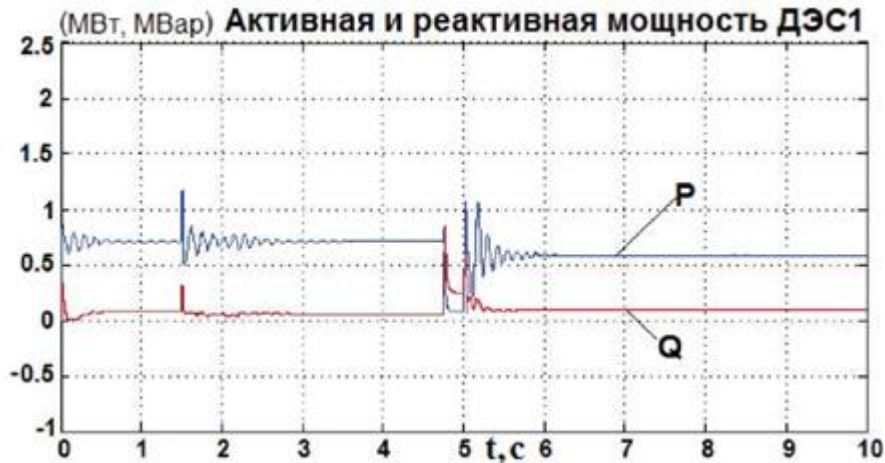


Рис. 3.57. Графік потужності в вузлі 18 (від ДЭС1) для сценарію VI



Рис. 3.58. Графік активної і реактивної потужностей ДЭС2 для сценарію VI

На рис. 3.57 - 3.58 показані графіки активної і реактивної потужності ДЭС 1 і ДЭС 2. З графіків видно, що перехідні процеси активної потужності в двох ДЭС 1 і ДЭС 2 не відрізняються. Динамічні характеристики асинхронних двигунів і синхронних машин в цьому випадку виходять так само, як в сценарії V. Різниця в тому, що при підключенні ще однієї установки РГ в системі дозволяє знижувати коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги в порівнянні зі сценарієм V.

На рис. 3.59 представлені осцилограми лінійної напруги, що ілюструють спектральний склад напруги на шинах трансформатора при включенні двох

установок розподіленої генерації в системі електропостачання. Видно, що рівень сумарних коефіцієнтів гармонійних складових напруги ($K_i = 6,50\%$) в нормально допустимих значеннях.

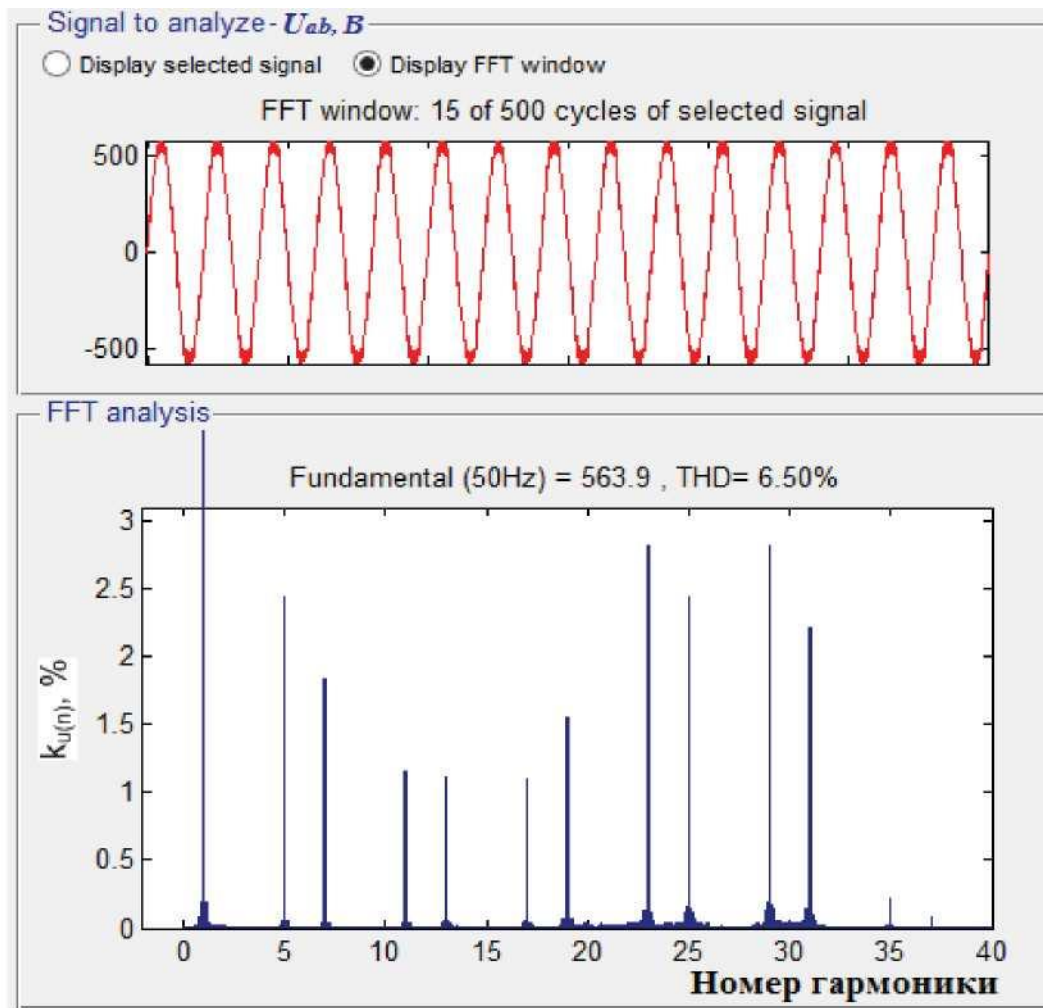


Рис. 3.59. Осцилограма напруги і спектральний склад напруги U_{ab} на шинах трансформатора при підключенні двох установок РГ в СЕС

Таким чином, у порівнянні з випадком, наведеними в розділах 3.4 і 3.5, результати сценаріїв V і VI показують, що застосування ЧРЕП при масовому використанні АТ (в якості приводу для насосів) є найкращим заходом з управління динамічними характеристиками системи електропостачання. Застосування ЧРЕП дає можливість стабілізувати напруги на лінії електропередачі при масовому пуску АД, а також в процесі відновлення після аварії в системі.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі були описані комп'ютерні експерименти, проведені на частини мережі СЕС сільськогосподарського району. Розроблена модель в програмі MATLAB і її пакеті Simulink представляють основні елементи складної системи електропостачання, що включає установки розподіленої генерації і частотно-регульований асинхронний електропривод. Проведені дослідження моделі показують відповідність поведінки елементів системи електропостачання фізичним уявленням.

Графічне зіставлення отриманих результатів між сценаріями експериментів дослідження динамічних режимів при аварійних ситуаціях показало наступні:

1. В результаті проведених експериментів вдалося показати вплив масового пуску асинхронних двигунів на роботу системи електропостачання району. З отриманих перехідних процесів в досліджуваних асинхронних двигунах видно, що використання частотно-регульованого приводу дає великі переваги. Знижується пусковий струм, скорочується час запуску двигуна, зменшуються значення падіння напруги. Все це сприятливо позначиться на електроспоживанні і призведе до його зниження. Також, можливо, збільшиться термін служби електрообладнання, зокрема обмотки двигунів не будуть перегріватися через велику пускового струму і довгого його дії.

2. Використання ЧРЕП дозволяє зменшити споживання реактивної потужності, а значить зменшити витрату палива дизельної електростанції.

При короткому замиканні перехідні процеси в системі електропостачання відбуваються складно і тому необхідно досліджувати багато сценаріїв. Сценарій I є базисом для здійснення наступних досліджень (в цьому випадку використовуються нерегульовані АТ). Через недостатню потужність ДЕС після короткого замикання автоматичний регулятор управління ДЕС не може забезпечити підтримання напруги на виході синхронної машини і тому швидкості обертання асинхронних двигунів поступово зменшуються до нуля, струм в статорі двигунів перевищує допустиму межу протягом тривалого часу,

що спричинить перегрів обмотки статора, далі все двигуни можуть бути пошкоджені. Для подолання проблеми автор провів різні дослідження в сценаріях II - VI. З результатів досліджень видно, що при аварійних ситуаціях масове використання АТ з ЧРЕП забезпечує відновлення системи електропостачання швидше і стабільніше. Таким чином, використання ЧРЕП дозволяє підвищити якість перехідних процесів, якість електроенергії, ступінь автоматизації, що забезпечує не тільки економію електроенергії, але і збільшення терміну служби обладнання (особливо в малопотужної мережі).

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі представлені результати вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає в дослідженні режимів системи електропостачання з розподіленою генерацією при масовому використанні асинхронних електроприводів (нерегульованих і частотно-регульованих).

Виконані дослідження дозволяють сформулювати такі основні результати і висновки роботи:

1. Розроблено імітаційну модель СЕП з розподіленою генерацією та частотно-регульованим електроприводом і виконані дослідження режимів роботи СЕП при дії різних чинників на імітаційній моделі тестової схеми. Результати моделювання на тестовій схемі показали, що пускові струми, час пуску і рівень напруги на шинах живлячої підстанції при пуску асинхронного двигуна шляхом прямого підключення двигуна до мережі, залежить не тільки від параметрів живильного трансформатора (потужності і напруги короткого замикання, але і від типу виробничих механізмів. При підключенні в СЕП установки РГ зменшуються відхилення напруги і глибина провалу напруги при пуску АД. При застосуванні ЧРЕП характеристики перехідного процесу істотно покращуються.

2. Одночасний пуск декількох асинхронних двигунів шляхом прямого підключення в мережу супроводжується значним падінням напруги на лінії електропередачі (глибина провалу напруги приблизно 22%), що ускладнює умови пуску двигунів і погіршує стійкість роботи споживачів, що підключені до мережі. В результаті дослідження встановлено, що в системі електропостачання з РГ і частотно-регульованим електроприводом вимоги до швидкодії і стійкості задовольняються.

3. Проведено дослідження системи електропостачання з РГ і масовим використанням АД (нерегульованих і частотно-регульованих) під час коротких замикань. Встановлено, що використання джерел РГ і частотно-регульованого електроприводу дозволяє забезпечити стійку роботу елементів в аварійних і післяаварійних режимах. Наявність джерел розподіленої генерації забезпечує

відновлення живлення системи електропостачання після її відключення від ЕЕС. При масовому використанні нерегульованих асинхронних двигунів процес відновлення режимів СЕП після аварії відбувається повільно навіть за умови відключена навантаження. У випадку застосування ЧРЕП відновлення режимів СЕП після відключення КЗ відбувається швидше і супроводжується меншими провалами напруги.

4. Показано, що у випадку підключення до СЕП додаткової установки розподіленої генерації в системі в аварійних і післяаварійних режимах зменшується падіння напруги, скорочується час повторного пуску при масовому використанні АД, а при використанні ЧРЕП знижуються сумарні коефіцієнти гармонійних складових напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Будько В.И. Современное состояние и развитие возобновляемой энергетики / В.И. Будько, С.А. Кудря, А.В. Пепелов // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 4-6. – С. 216–218.
2. IRENA, REmap 2030 Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні, IRENA, Абу-Дабі (2015) [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://saee.gov.ua/sites/default/files/UKR%20IRENA%20REMAP%20_%202015.pdf.
3. Дячук О. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелєв, Р. Подолець та ін. // К: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. – 88 с.
4. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. 2011. – №1. – С. 46 – 53.
5. Павловський В.В. Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умови приєднання до електричної мережі / В.В. Павловський та ін. // Праці ІЕД НАНУ. – 2016. – №. 43. – С. 18-23.
6. Собчук Д.С. Комплексне оцінювання надійності функціонування розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії / Д.С. Собчук // Луцький національний технічний університет.– 2016. - № 1(4). – С. 9-12.
7. Собчук Д.С. Алгоритмічна реалізація оцінювання впливу відновлюваних джерел електроенергії на надійність електричних мереж / Д.С. Собчук // LARGOS.– 2015. - № 1. – С. 93-100.
8. Лежнюк П.Д. Оцінювання впливу відновлюваних джерел електроенергії на функціонування електричних мереж / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.А. Буславець, В.В. Тептя // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2015. – №165. – С. 40-49.

9. Бudyко В.І. Перспективи використання джерел розподіленої генерації в енергосистемі України / В.І. Бudyко, О. В. Остапчук // Енергозбереження та енергоефективність - 2018. – м. Дніпро, 2018.

10. Кузнецов М.П. Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ / М.П. Кузнецов, О.В. Лисенко, О.А. Мельник // Відновлювана енергетика. – 2018. – № 2. – С. 6-15.

11. Зарубіжна практика стимулювання розвитку поновлюваних джерел енергії та їх приєднання до електромереж енергосистем / Звіт. Київ: НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики, 2012 р. – 75 с.

12. Варецький Ю. О., Горбань В. М., Пазина Я. С. Зміни напруги в електричній мікромережі з гібридною електростанцією. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні і електромеханічні системи. 2016. № 840. С. 17 – 23.

13. Жаркин А. Ф., Попов В. А., Сахрагард Саид Банузаде и др. Многокритериальная оценка альтернативных вариантов интеграции источников распределенной генерации в распределительные сети. Электронное моделирование. 2016. Т. 38, № 1. С. 99 – 112.

14. Жаркин А. Ф., Попов В. А., Ткаченко В. В. Оптимальное секционирование воздушных распределительных сетей в условиях применения распределенной генерации. Технічна електродинаміка. 2017. № 2. С. 61 – 69.

15. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах. Технічна електродинаміка. 2011. № 1. С. 46 – 53.

16. Комар В. О., Ковальчук О. А., Кузьмик О. В. Влив розосередженого генерування на якість функціонування розподільних електричних мереж / Технічна електродинаміка. 2012. № 2. С. 34 – 35.

17. Комар В. О., Кузьмик О. В. Дослідження впливу відновлюваних джерел електричної енергії на режим роботи розподільних електричних мереж . V Міжн. науково-техн. конф. «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання

в электротехнических приборах и системах". Луцк Шацькі озера, 2014. С. 116 – 117.

18. Комар В. О., Остра Н. В., Кузьмик О. В., Гуцол С. В. Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж. Наукові праці Донецького національного технічного університету. 2013 № 1 (14). С. 104 – 107.

19. Кулик В. В., Магас Т. Є., Малогулко Ю. В. Оптимальне керування розосередженими джерелами електроенергії з асинхронними генераторами засобами Smart Grid . Електронний журнал "Наукові праці ВНТУ". – 2011. – № 4. – С. 1–6. – URL: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1404/999>.

20. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Лесько В. О., Кузьмик О. В. Оптимізація режимів розподільних електричних мереж в умовах зростання частки розосередженого генерування. Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження АПК України. 2012. № 129. С. 29 – 32.

21. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження АПК України. Харків: ХНТУСГ, 2013. Випуск 141. С. 8 – 10.

22. Ньюшлосс Д. Развитие распределенной генерации / Д. Ньюшлосс, И. Ю. Ряпин // Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, Август 2012. – 38с.

23. Безруких П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии. / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г. А. Борисов и др. // Спб.: Наука. – 2002. – 314 с.

24. Вопросы и ответы о возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс] // ОАО «РусГидро» 2006-2013. – Режим доступа: <http://www.rushydro.ru/industry/biblioteka/14289.html>.

25. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кулик В. В. Вплив відновлюваних джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж. Енергетика та електрифікація. 2015. № 1. С. 8 – 12..

26. Воропай Н.И. Предпосылки и перспективы развития распределенной генерации в электроэнергетических системах // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сб., докл. Всерос. н.-т. конф., Благовещенск. – октябрь 5-7. – 2005.

27. Воропай Н.И. Требования к противоаварийному управлению ЭЭС с учетом изменения условия их развития и функционирования / Н. И. Воропай, Д.

Н. Ефимов // Надежность либерализованных систем энергетики. – Новосибирск: Наука. – 2004. – С. 74-84.

28. Энергетика XXI века: Условия развития, технологии, прогнозы / Л.С. Беляев, А.В. Лагереv, В.В. Посекалин и др.; Отв. ред.Н.И. Воропай // Новосибирск.: Наука. – 2004. – 386 с.

29. Еремин Л.М. О роли локальных генерирующих источников небольшой мощности на рынке электроэнергии / Л. М. Еремин // Энергетик. – 2003. – № 3. – С. 22-25.

30. Нюшлосс Д. Тенденции развития распределенной генерации / Д. Нюшлосс, И. Ю. Ряпин // НП «АВОК», Энергосбережение № 7/2012. – С. 18-26.

31. Гуляев И. В. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя: монография / И.В. Гуляев, Г.М. Тутаев // Саранск.: Изд-во. Саранского ун-та, 2010. – 200 с.

32. Фролов Ю.М. Состояние и тенденции развития электропривода/ Ю.М. Фролов // Электрические комплексы и системы управления. – 2006. – №1. – С. 4-10.

33. Колпаков А.И. Перспективы развития электропривода/ А.И. Колпаков// Силовая электроника. – 2004. – №1. – С. 46-48.

34. Бычков М.Г. Вентильно–индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] / М.Г.Бычков //Рынок

Электротехники. – 2007. – №2. – Режим доступа: <http://www.marketelectro.ru/magazine/readem0207/10>, свободный.

35. Лазарев Г.Б. Опыт и перспективы применения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в электроэнергетике России [Электронный ресурс] / Г.Б. Лазарев // Новости приводной техники. – 2003. – №5. – Режим доступа: http://www.privod-news/ru/may_03/25-3htm, свободный.

36. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Підвищення якості електропостачання шляхом розбудови відновлюваних джерел електроенергії: Монографія. Луцьк : Луцький НТУ, 2015. 136 с.

37. Бурковский В.Л., Особенности построения систем управления экскаваторными электроприводами / В.Л. Бурковский, Р.В. Шкода // Электротехнические комплексы и системы. – 2006. – №2. – С. 4-10.

38. Панкратов В.В. Вентильный привод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза / В.В. Панкратов // Электронные компоненты. – 2007. – №2. – С. 68-77.

39. Чупин С.А. Применение частотно-регулируемого электропривода эффективное решение проблемы энергосбережения на объектах тепло-, водоснабжения и вентиляции / С.А. Чупин // Вест. энергосбережения Юж. Урала. – 2003. – №2 (9).

40. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины / А.В. ИвановСмоленский // М.: Энергия. – 1980г. – 928с.

41. Леонтьев А.Г. Электромеханические системы [Электронный ресурс] / А.Г. Леонтьев, В.М. Пинчук, И.М. Семенов // СПбГТУ. – СПб. – 1997. – Режимдоступа: <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html>, свободный.

42. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 360 с.

43. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення. Технічна електродинаміка. 2010. № 6. С. 44 – 50.

44. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Ю.С. Забродин. – М.: Высш. шк. – 1982. – 496 с.
45. Соколова Е.М. Сравнительный анализ динамики электроприводов переменного и постоянного тока для механизмов кабельного производства / Е.М. Соколова // Электротехника. – 2007. – №8. – С. 32-37.
46. Бичай В. Г. Состояние, тенденции и проблемы в области методов управления асинхронными двигателями / В.Г. Бичай, Д.М. Пиза, Е.Е. Потапенко, Е.М. Потапенко // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2001. – №1. – С. 138-144.
47. Залецкий В.С. Современный регулируемый электропривод [Электронный ресурс] / В.С. Залецкий // Рынок электротехники. – 2006. – №3. – Режим доступа: <http://marketelectro.ru/magazine/readem0306/38>, свободный.
48. Макаров Л.Н. Совершенствование серийных асинхронных машин в условиях массового производства / Л.Н. Макаров // Электричество. – 2005. – №7. – С. 62-69.
49. Муравлева О.О. Концепция и пути создания энергоэффективных асинхронных двигателей / О.О. Муравлева // Электричество. – 2007. – №6. – С. 50-52.
50. Панкратов В.В. Математическое моделирование асинхронных электрических машин и машин двойного питания / В.В. Панкратов, Е.А. Зима // Электротехника. – 2003. – №9. – С. 19-24.
51. Тяговый двигатель с возбуждением от постоянных магнитов / Железные дороги мира. – 2004. – №9. – С. 31-36.
52. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики / В.В. Хрущев // Учеб. для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. – Ленингр. – отд. – 1985. – 386 с.
53. Онищенко Г.Б. Электрический привод / Г.Б. Онищенко // Учеб. Для вузов. – М. – РАСХН. – 2003. – 320 с.
54. Вентильный электропривод: шанс для российских производителей. [Электронный ресурс] / Оборудование: рынок, предложение, цены // – 2004. – №1. – Режим доступа: <http://www.speckomplekt.ru/st3.html>, свободный.

55. Тихменев Б. Н. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе / Б.Н. Тихменев, Н.Н. Горин, В.А. Кучумов, В.А. Сенаторов // М.: транспорт. – 1976. – 280 с.
56. Тюрин А.А. Векторное управление асинхронными электроприводами / А.А. Тюрин, А.Ф. Симаков, А.В. Морозова // ГРНТИ. 45.29.31.
57. Недолугий С. В. О преимуществах применения частотнорегулируемых электроприводов / С. В. Недолугий // Энергетик. – 2010. – №9. –С. 21-24.
58. Мягков Ф.Н. Моделирование параллельной работы центробежных насосов с регулируемой частотой вращения / Мягков Ф.Н. // Электрические станции. – 2012. – №1.– С. 45-50.
59. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: «Высшая школа», 2001. – 327 с.
60. Григорьев А.В. Моделирование шестифазной синхронной машины в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. “Компьютерное моделирование 2006”. – СПб.: Изд-во Политехнического университета. – 2006.
61. Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шаргин // Монография. - СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 300 с.
62. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс. – 2008. – 288 с.
63. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона – Принт, 2001. 152
64. Хватов О.С. Управляемые генераторные комплексы на основе машины двойного питания / О. С. Хватов. – Н.Новгород. – НГТУ. – 2000 г.
65. Ju-chirl Park. Modeling and simulation of selected distributed generation sources and their assessment.// Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University. – Morgantown, 1999.

66. Katiraei F. Diesel plant sizing and performance analysis of a remote wind/diesel microgrid / F. Katiraei, C. Abbey // Proceeding of the IEEE-PES 2007 General meeting.
67. Gillie M. F. Operation and regulation of a wind and gas virtual power plant, / M. F. Gillie, W. E. Leithead // 17th Intl. Conference Electricity Distribution, Barcelona, May 2003.
68. Jeffries W.Q. Development of a dynamic model for no storage wind/diesel systems / W.Q. Jeffries, J.G. Mc Gowam, J.F. Manwell // Chalmers University of Technology, Sweden 2004.
69. Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, Dynamic Models for Combined Cycle Plants in Power System Studies/ // IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, № 3, August 1994.
70. Gagnon R. Modeling of a generic high - performance of no storage wind - diesel system using MATLAB/Power systems blockset / R. Gagnon, B. Saulnier, G. Sybille, P.Giroux // European Wind Energy Association, Global Wind power conference (2002).
71. Jimeno J. Architectural Framework for the Integration of Distributed Resources / J. Jimeno, I. Laresgoiti, J. Oyarzabal, B. Stene, R. Bacher // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003. – p. 91-96.
72. Hannett L. N. A Governor-Turbine Model for a Twin-Shaft Combustion Turbine / L. N. Hannett, G. Jee, and B. Fardanesh // IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, №1, Feb. 1995.
73. Hannett L. N. Combustion Turbine Dynamic Model Validation from Tests / L. N. Hannett, Afzal Khan // IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, №1, Feb 1993.
74. P. M. Anderson and M. Mirheydar, Analysis of a Diesel Engine Driven Generating Unit and The Possibility for Voltage Flicker // IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, № 1, March 1995.
75. Stefanopoulou A. G. Control of Variable Geometry Turbocharged Diesel Engines for Reduced Emissions / A. G. Stefanopoulou, I. Kolmanovsky

//Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, June. 1998.

76. Roy S. An Adaptive Control Scheme for Speed Control of Diesel Driven Power Plants / S. Roy, O. P. Malik, G. S. Hope // IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, №4, December 1991.

77. Filreker V. F. Wind Turbine Generator Interaction with Diesel Generators on an Isolated Power System / V. F. Filreker, R. K. Shaltens // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, №5, May 1984.

78. Perahia J. Model and simulation of a stand alone power system comprising a diesel engine driven synchronous generator and a power conditioner / J. Perahia, C. V. Nayar // International Journal of Electrical Education. 1998. Vol.35. p. 245-270.

79. Omar S. M. Transient Performance Evaluation of Nuclear Generating Station Standby Diesel Generators // IEEE Systems Research International, Great Falls, VA, 1993. – p. 902-906.

80. Yahay H. Z. A Mathematical Transient Model for the Dynamics of a Single-Cylinder Diesel Engine / H. Z. Yahay, F. W. James, D. S. Lakmal // Department of Mechanical Engineering, King's College London, UK, Sep. 1998. p. 145-151.

81. Drouilhet S. M. Power Flow Management in a Wind-Diesel Hybrid Power System with Short-Term Energy Storage // Conference: Windpower' 99, Burlington, Vermont, June 20–23 1999.

82. SimPowerSystems User's Guide For Use with Simulink, 1998-2006 TransÉnergie Technologies Inc., under sublicense from Hydro-Québec, and The MathWorks, Inc.

83. MATLAB power system blockset user's guide, The Mathworks Inc., 1997г.

84. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электропроводах / А.Д. Поздеев //Чебоксары.: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.

85. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев // Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

86. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский // Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

87. Осипов О. И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод / О. И. Осипов // Учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 80 с.

88. Рудаков В. В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В. В. Рудаков, И. М. Столяров, В. А. Дартау, Л.: Энергоатомиздат. – 1987. – 136 с.

89. Удут Л. С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод /Л. С. Удут, Н. В. Кояин, О. П. Мальцева // Учебное пособие. – Томск.: Издательство Томского политехнического ун-та, 2009. – 354 с.

90. Кремлев И. А. Моделирование питающих и распределительных сетей / И. А. Кремлев, Т. В. Комякова, Р. Б. Скоков //Методические указания к выполнению лабораторных работ. – Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009.– 34 с.

91. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK / В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова // Учебное пособие для студентов и аспирантов. – К.: НАН Украины, 2008. – 91 с.

92. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода /М. Г. Чиликин, А. С.Сандлер // Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат. – 1981. – 576 с.

93. Закарюкин В. П. Математические модели узлов нагрузки электроэнергетических систем, построенные на основе фазных координат/ В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Ле Конг Зань. – Иркутск: ИрГУПС. – 2013. – 176 с.

94. Кацман М. М. Электрические машины / М. М. Кацман // Учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. – 8-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 496 с.

95. Котеленец Н. Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов // Учебник для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.
96. Барутсков И. Б. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты / И. Б. Барутсков, С. А. Вдовенко, Е. В. Цыганков // Главный энергетик. – 2011. – № 6. – С. 5–15.
97. Григорьев О. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О. Григорьев, В. Петухов, В. Соколов, И. Красилов // Новости электротехники. – 2002. – № 6.
98. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов. – 2014г. – 20с.
99. Техническая коллекция Scheneider Electric. Устройства плавного пуска и преобразователи частоты. – Выпуск №38. – май, 2011 г.
100. Голованов И. Г. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Часть 2. Электромеханические переходные процессы / И. Г. Голованов, Н. Г. Голованова // Учебное пособие. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2014. – 189 с.
101. Фокин Ю. А., Туфанов В. А. Оценка надёжности систем электроснабжения. М.: Энергоиздат, 1981. 224 с.
102. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. К.: Наукова думка, 1985. 268 с..
103. Chowdhury A., Koval D. Power distribution system reliability: practical methods and applications. IEEE PRESS + WILEY, 2009. 531 p.
104. Distribution Feeder Scheduling Considering Variable Load Profile and Outage Costs / Shih-An Yin, Chan-Nan Lu IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, №. 2, may 2009. P. 652 – 660..
105. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев // Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. – СПб., 2002.

106. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич // СПб.: БХВ-Петербург. – 2007. – 364 с.

107. J. Enslin, P. Heskes, «Harmonic Interaction Between a Large Number of Distributed Power Inverters and the Distribution Network. IEEE Transaction on power electronics. 2004. Vol. 19, No. 6. P. 1586–1593. DOI: 10.1109/PESC.2003.1217719..

108. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат.- 1989.– 592 с.: ил.

109. Правила устройства электроустановок ПУЭ. Раздел 2. Передача электроэнергии. Главы 2.4, 2.5. –7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 160с. – ил.

110. Лазарев Г. Б. Опыт и перспективы применения частотнорегулируемых асинхронных электроприводов в электроэнергетике России / Г.Б. Лазарев //Новости приводной техники. – 2003. – №5. «http://www.privodnews.ru/may_03/25-3.htm».

Додатки

Додаток А

Моделювання системи частотно-регульованого електроприводу

Модель електроприводу разом з регуляторами швидкості (РС) і струму (РТ) представлена на рис. п.1.7.

Модулі в системі частотно-регульованого асинхронного двигуна як ПІ-регулятори струму та швидкості, координатні і фазні перетворення, ШІМ інвертора - створені з використанням стандартних блоків Simulink в бібліотеці MATLAB.

Метою моделювання є побудова характеристик залежності моменту і кутової швидкості обертання електродвигуна від часу при пуску, а також визначення регулювання і часу перехідного процесу. Для проведення моделювання в моделі частотно-регульованого АД використано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором 4АН225М4У3, призначений для приводу різних механізмів (верстатів, насосів, компресорів, млинів і т.п.).

Двигун моделюється Asynchronous Machine блок в бібліотеці програми MATLAB, який використовується в цьому дослідженні має 100 к.с. (75кВт), 400 В, 50 Гц, чотириполюсний .

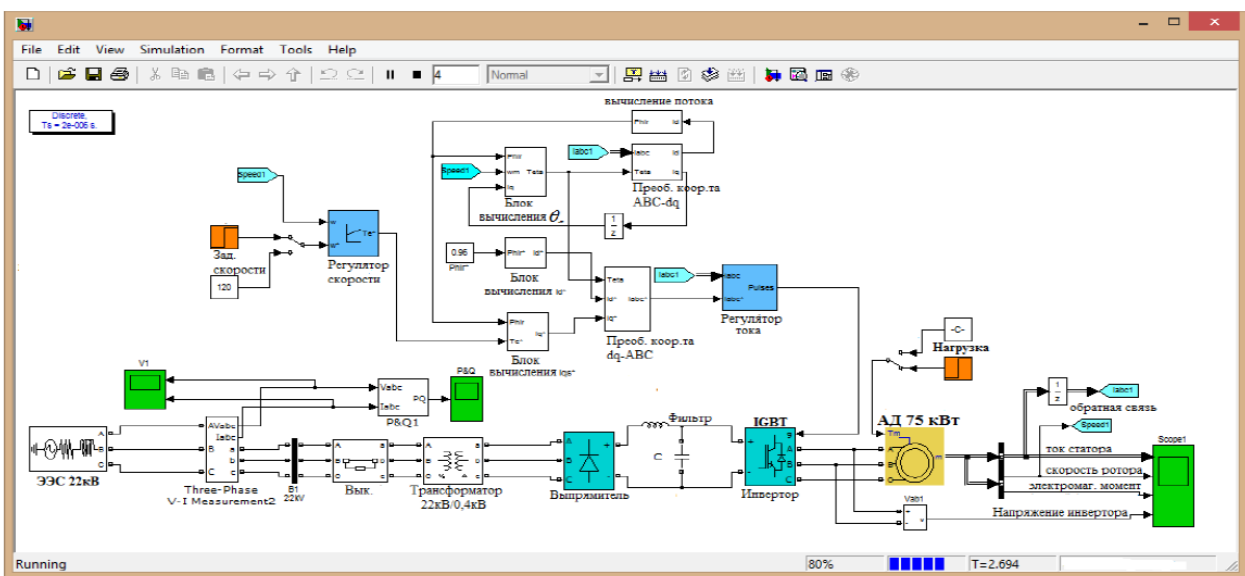


Рис.ДА.1.1 Модель системи частотно-регульованого АД в програмі MATLAB

Додаток Б

Моделювання дизельної електростанції

Для розподіленої генерації в системі електропостачання була обрана дизельна електростанція.

При моделюванні були зроблені наступні допущення:

1. підключення до шин основного споживача здійснюється миттєво;
2. модель дизельного двигуна лінеаризована і не враховує залежність механічної потужності на валу від температури і об'єму споживаного повітря.

Модель дизельної електростанції приведена на рис. Д.Б.1 складається з підблоку системи збудження, підблоку дизельного двигуна, вимірювального блоку і декількох допоміжних блоків.

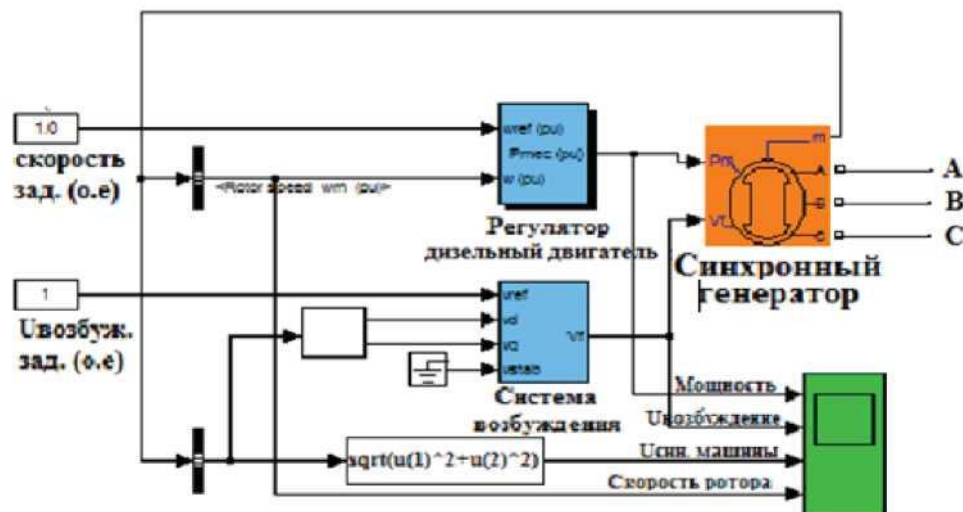


Рис. Д.Б.1. Модель дизельної електростанції

Зовнішній вигляд блоку дизельного двигуна наведено на малюнку п.2.2. Модель складається з моделі системи регулятора швидкості, моделі актуаторного приводу і моделі двигуна. Система управління приводом за допомогою актуаторного приводу регулює подачу палива в циліндри двигуна. Модель приводу реалізує затримку при зміні подачі палива і реалізує зниження або збільшення моменту приводу в залежності від знака зміни кількості подаваного в циліндри палива. Кожна з ланок моделі системи управління реалізовано лінеаризованою функцією [82, 83, 106]. Система регулювання

швидкості обертання приводу має настройки, близькі до налаштувань на технічний оптимум.

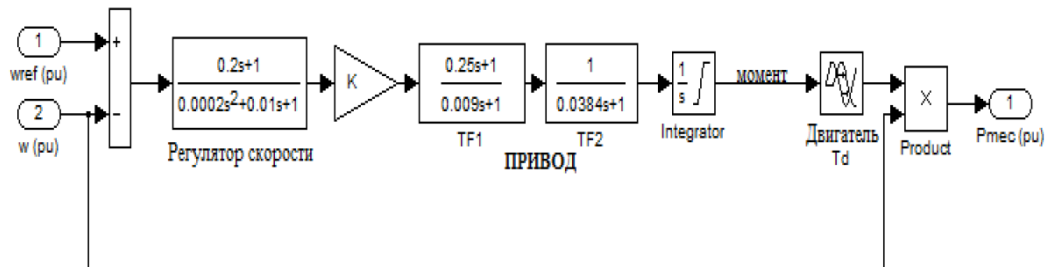


Рис. Д.Б.2. Модель дизельного двигуна в програмі MATLAB/SIMULINK

Модель системи збудження складається з наступних блоків: блок виділення діючого значення напруги, блок фільтра низьких частот, блок компенсації тимчасової затримки, блок головного регулятора, блок регульованого випрямляча і блок демпфованого зворотного зв'язку. Налаштування регулятора близькі до налаштувань на технічний оптимум.

Модель реалізує систему збудження з використанням програми MATLAB/SIMULINK, як показано на рис. Д.Б.3.

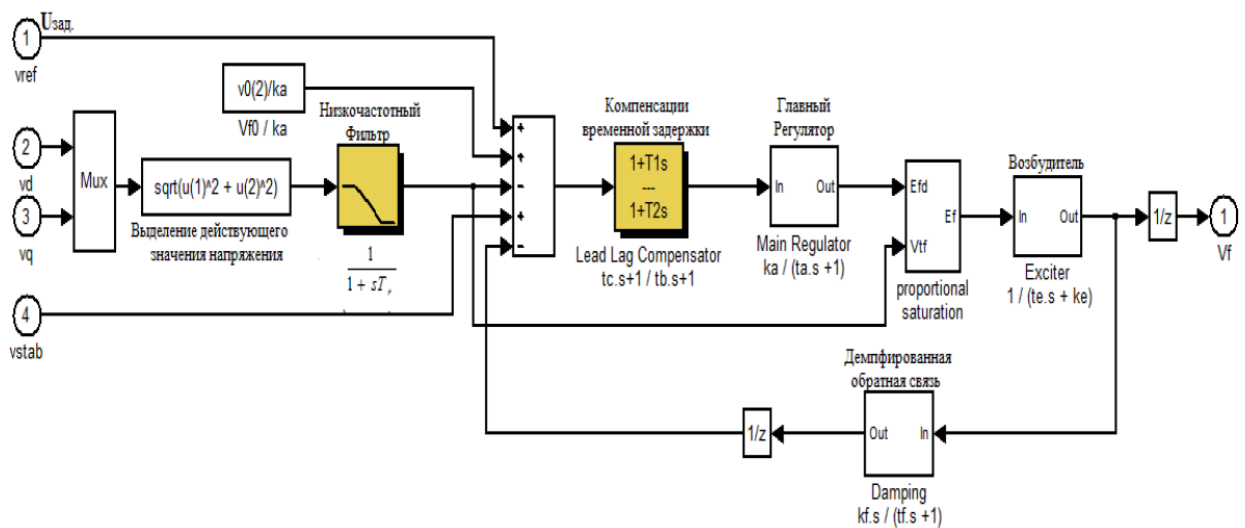


Рис. Д.Б.3. Модель системи збудження в програмі MATLAB/SIMULINK

Додаток В

Моделювання елементів електричної мережі

Елементи ЕЕС є, як правило, трифазними пристроями змінного струму, і ЛЕП мають три фази, які приєднуються до інших трифазним елементів мережі, наприклад, до трансформаторів і споживачів.

Моделювання двообмоткових трансформаторів в програмі MATLAB

За паспортними даними трансформатора визначають параметри схеми заміщення трансформатора, які представлені на рис. Д.В.1

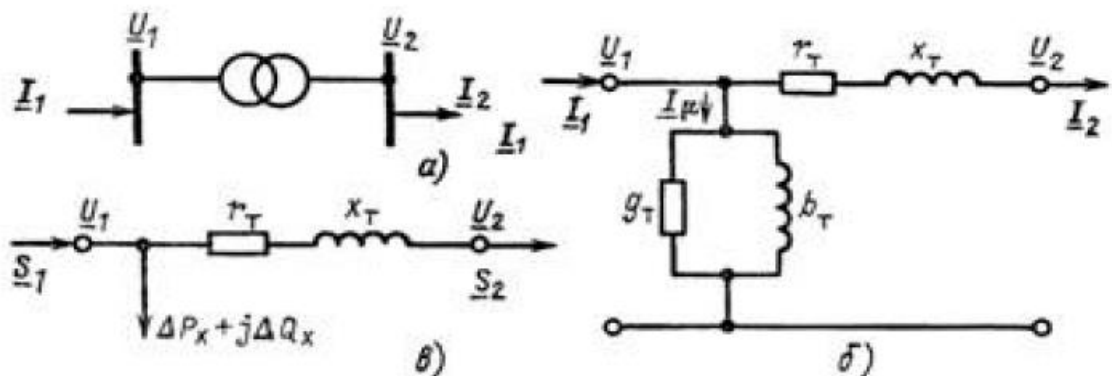


Рис. Д.В.1. Двообмотковий і трансформатор:

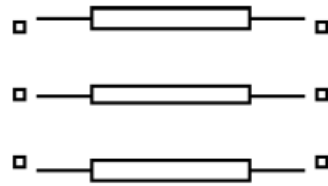
а - умовне позначення; б - Г-подібна схема заміщення; в - спрощена схема заміщення

Моделювання повітряної лінії електропередачі в програмі MATLAB

Повітряна лінія електропередачі моделюється блоками «Three-Phase Distributed Parameters Line» (рис. Д.В.2).

Блоку «Three-Phase Distributed Parameters Line» відповідає трифазна трехпроводная лінія з наступними параметрами:

- частота мережі, 50 Гц;
- питомий активний, індуктивний і ємнісний опори прямої і нульової послідовностей (згідно довідковим і розрахунковими даними) на 1 км довжини лінії;
- довжина лінії, км.



Distributed Parameters Line

Рис. Д.В.2. Піктограма ПЛ в середовищі MATLAB

Для визначення параметрів повітряної лінії електропередачі

використовувалася програмне середовище Matlab, додаток Simulink. Інструмент Compute RLC Line Parameters (рис. Д.В.3) забезпечує обчислення параметрів моделей ліній електропередачі на підставі характеристик проводів і геометричних розмірів лінії. За заданим геометричним параметрам проводів (радіусу, відстані між проводами, висоті підвісу проводу над землею, стрілі провисання і ін.) можуть бути визначені погонні параметри лінії.

Conductor (bundle)	Phase number	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor (bundle) type
p 1	1	-1.4	14	14	1
p 2	2	0	14	14	1
p 3	3	1.4	14	14	1
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

Conductor (bundle) type	Conductor outside diameter (cm)	Conductor T/D ratio	Conductor GMR (cm)	Conductor DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability	Number of conductors per bundle	Bundle diameter (cm)	Angle of conductor 1 (degrees)
1	0.944	0.375	0.37773	0.42	1	1	0	0
-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. Д.В.3. Інтерфейс програми обчислення параметрів ПЛ

У командному вікні інструменту Compute RLC Line Parameters блоку Powergui програми MATLAB / Simulink, задаються параметри ПЛ (рис. Д.В.3.):

- Номінальна напруга ПЛ,
- частота,
- координати фаз і блискавкозахисного тросу,
- діаметр проводів,
- активний опір фаз,
- число провідників в фазі,
- питомий опір землі,
- наявність скін-ефекту.

Моделювання реального електричного навантаження в програмі MATLAB

Моделювання реальної електричного навантаження вузла мережі є складним завданням. Комплексне навантаження вузла мережі в загальному випадку складається з статичного і динамічного навантаження. У розрахунках електромеханічних перехідних процесів статичне навантаження можна представити шунтом з постійними параметрами, вважати потужність навантаження постійною або залежною від напруги і частоти по статичним характеристикам навантаження. Динамічне навантаження, яке має асинхронну і синхронну складові, можна представити еквівалентними асинхронним і синхронним двигунами.

В даний час існує безліч моделей, які можуть бути застосовані для розрахунку. У програмі MATLAB модель навантаження використовується у вигляді моделі в показовій формі. Ця модель описує залежність від величини напруги і визначається у відповідності з наступним рівнянням:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_H} \right)^\alpha$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_H} \right)^\beta$$

Коефіцієнти α і β є показниками ступенів, які визначають властивості навантаження, U_H є номінальним значенням напруги, P_0 і Q_0 номінальні

значення активної і реактивної потужності. Коефіцієнти α і β варіюються для кожного типу навантаження.